



**Casa abierta al tiempo**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA IZTAPALAPA

---

**El modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff:  
una introducción y evaluación crítica**

Tesis que presenta:

ISRAEL GRANDE GARCÍA,

para obtener el grado de

*Maestro en humanidades, línea historia y filosofía de la ciencia*

Director: Dr. SÍLVIO JOSÉ MOTA PINTO

México, junio de 2006

## **CAPÍTULO 1. Introducción 4**

1.1. Los modelos cuánticos de la conciencia 4

1.2. Penrose, Hameroff y la física de la conciencia 7

1.3. Plan del trabajo 9

## **CAPÍTULO 2. El modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff: una introducción 11**

2.1. El modelo cuántico de Penrose y Hameroff: un resumen 11

2.2. La tesis de la no computabilidad de la conciencia 15

2.2.1 *La no computabilidad de la conciencia* 17

2.2.2 *El nuevo argumento de Penrose a favor de la no computabilidad de la conciencia* 22

2.3. Reducción del vector de estado vía gravedad cuántica 25

2.4. Computación cuántica 31

2.5. Coherencia y computación cuánticas en los microtúbulos 34

2.5.1 *Coherencia y computación cuánticas en el cerebro* 34

2.5.2 *Los microtúbulos citoesqueléticos* 37

2.5.3 *Coherencia y computación cuánticas en los microtúbulos* 42

2.6. El modelo de reducción objetiva orquestada en los microtúbulos 50

2.6.1 *Supuestos iniciales* 50

2.6.2 *Reducción objetiva orquestada en los microtúbulos*

*(el modelo RO Orq de la conciencia)* 53

**CAPÍTULO 3. El modelo cuántico de la conciencia  
de Penrose y Hameroff: una evaluación crítica 57**

3.1. Alteraciones del funcionamiento microtubular  
no conducen a perturbaciones de la conciencia 58

3.2. La coherencia cuántica a gran escala en el cerebro  
es insuficiente para el surgimiento de la conciencia 60

3.3. Dificultades con la hipótesis de la correlación temporal 62

3.4. La conciencia y la anestesia general 69

Conclusiones 72

Referencias 74

### 1.1. LOS MODELOS CUÁNTICOS DE LA CONCIENCIA

Las últimas dos décadas han atestiguado el desarrollo de un creciente interés por el problema de la conciencia. En los países occidentales la conciencia fue relegada de los escenarios científicos durante casi toda la primera mitad del siglo pasado, debido principalmente a la marcada influencia de la corriente conductista en América y del desarrollo del psicoanálisis en Europa. Sin embargo, a partir de los años cincuenta el desarrollo de viejas y nuevas disciplinas como la etología, las neurociencias, la teoría de la información, las ciencias de la computación, las ciencias cognoscitivas, entre otras, hizo que los investigadores volvieran la mirada hacia el estudio de los fenómenos psicológicos que habían sido relegados, como la conciencia. Así, actualmente la conciencia ha dejado de ser un problema meramente filosófico para convertirse en uno de los pendientes de la agenda científica<sup>1</sup> de un ejército de investigadores (la mayoría de ellos europeos, australianos y norteamericanos) de los más diversos campos (filósofos, psicólogos, psiquiatras, neurofisiólogos, neuropsicólogos, anesthesiólogos, bioquímicos, biofísicos, biólogos moleculares, etólogos, antropólogos, lingüistas, expertos en computación e informática, ingenieros y expertos en inteligencia artificial, entre muchos otros), quienes han sido responsables y promotores del creciente interés por el estudio científico y filosófico de la conciencia.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Gray 1992.

<sup>2</sup> La literatura sobre la conciencia de los últimos años es numerosa. Una colección de textos clásicos en psicología y neurociencias es Baars, Banks y Newman 2003. La colección de Block, Flanagan y Güzeldere 1997, contiene también algunos trabajos clásicos, pero en filosofía. Algunas introducciones a las teorías de la conciencia para el público general son Blackmore 2004, Carter 2002 y Zeman 2002. Una reciente colección de textos filosóficos más avanzados es la de Smith y Jokic 2003. Sobre la neurobiología de la conciencia véase las colecciones de Laureys 2005, Metzinger 2000 y Osaka 2003. En castellano la literatura sobre la conciencia es escasa, aunque ya han sido traducidas las obras de algunos de los principales autores que estudian este fenómeno, incluidos los trabajos de Roger Penrose que reviso en este trabajo. Para el que desee empezar a estudiar algunas teorías, en mi tesis de pregrado (Grande García 2001) hice una extensa revisión de diferentes modelos teóricos de la conciencia, tanto científicos como filosóficos, así como del problema mente-cerebro. En otro trabajo (Escotto-Córdova y Grande-García 2005) se presenta un panorama histórico del estudio de la conciencia. En 1979 el desaparecido Augusto Fernández-Guardiola editó un buen texto sobre la conciencia que reunía las opiniones de reconocidos autores hispanoamericanos, principalmente mexicanos (Fernández-Guardiola 1979). Un texto más reciente en castellano es el de Alberto Carreras 1999. La compilación de Díaz y Villanueva 1996, contiene las traducciones de algunos artículos científicos sobre la conciencia, mientras que la compilación de Ezcurdia y Hansberg 2003, contiene las

Una serie de modelos teóricos que ha ganado cierta popularidad entre algunos investigadores hace uso de la física cuántica para dar cuenta de la conciencia. Sin embargo, como bien señala el español J. Pastor-Gómez<sup>3</sup> estos modelos no comparten un fondo filosófico común, ya que sus enfoques pueden ir desde un dualismo muy extremo e incluso religioso como el que plantean John Eccles<sup>4</sup> y Amit Goswami,<sup>5</sup> hasta una postura fisicista como la del modelo cuántico de Penrose y Hameroff del cual se ocupa el presente trabajo.

De acuerdo con Harald Atmanspacher<sup>6</sup> existen al menos tres formas en las cuales estos modelos adoptan la física cuántica para explicar la conciencia. Una primera forma consiste en adoptar las ideas básicas de la física cuántica de un modo puramente metafórico. Términos cuánticos como entrelazamiento, superposición, colapso, complementariedad, entre otros, se usan sin hacer ninguna referencia específica a cómo son definidos y a cómo se aplican a situaciones específicas. Por ejemplo, los actos conscientes simplemente se postulan como análogamente interpretables a los actos físicos de medición, mientras que las correlaciones en los sistemas psicológicos se postulan como análogamente interpretables al entrelazamiento cuántico. Un ejemplo de este tipo de modelos es el que han desarrollado Marshall y Zohar,<sup>7</sup> quienes sugieren que las propiedades holísticas de los condensados Bose-Einstein tipo Fröhlich pueden ser análogas a las propiedades holísticas de la conciencia, por lo cual han propuesto que la conciencia puede surgir de la excitación de los condensados Bose-Einstein en el cerebro. Algunos modelos de este tipo pueden llegar a rayar incluso en lo esotérico y religioso. Por ejemplo, algunos autores han propuesto que la no localidad cuántica puede permitir a la conciencia actuar sobre el mundo físico, lo cual podría dar cuenta de supuestos fenómenos paranormales como la ‘telequinesis’, la ‘actividad poltergeist’, la ‘teletransportación’ y la ‘levitación’ e incluso cosas tan extremas como la ‘reencarnación’ y la ‘transmigración de las almas’.<sup>8</sup> Estos modelos, dice Atmanspacher, “...may provide fascinating science fiction, and

---

traducciones de algunos textos filosóficos de la última mitad del siglo pasado, incluida una traducción del clásico artículo de Nagel de 1974 “What is it like to be a bat?”

<sup>3</sup> Pastor-Gómez 2002, p. 87.

<sup>4</sup> Eccles 1994.

<sup>5</sup> Goswami 1993, 2001.

<sup>6</sup> Atmanspacher 2004, pp. 58 y 59.

<sup>7</sup> Marshall 1989; Zohar 1990, 1996.

<sup>8</sup> Véase e.g., Goswami 2001; Pratt 2003. Recientemente fue exhibido un filme-documental norteamericano llamado *What the bleep do we know?* —en los países de habla castellana el filme llegó con el título de *¿Y tú qué @#!\* sabes?*; véase Arntz, Chasse y Vicente 2005—, en el cual se divulga este tipo de enfoques místicos y

they may even be important to inspire nuclei of ideas to be worked out in detail. But unless this detailed work leads beyond pure metaphors and analogies, they do not yet represent scientific progress”.<sup>9</sup>

Una segunda forma incluye aquellos enfoques que retoman el *status quo* de la teoría física para describir los procesos neurofisiológicos que pueden subyacer a las funciones cognitivas como la conciencia. Algunos de los primeras ideas al respecto fueron desarrolladas por el biólogo J. B. S. Haldane,<sup>10</sup> más tarde por Eugene Wigner<sup>11</sup> y más recientemente han sido defendidas por Henry Stapp.<sup>12</sup> Dentro de estos enfoques se cuentan también algunos modelos más desarrollados como el de Ewan Harris Walker,<sup>13</sup> quizá el primer modelo cuántico detallado de la conciencia, de acuerdo con el cual el efecto túnel es el efecto cuántico que está involucrado en el funcionamiento sináptico a través de las hendiduras sinápticas, y por lo tanto parece constituir el mecanismo físico que subyace a la conciencia. Otro destacado ejemplo es el modelo de Beck y Eccles<sup>14</sup> el cual, como el de Walker, retoma el efecto túnel, pero sugiere que está involucrado en la exocitosis (la apertura momentánea de un canal en la membrana presináptica y la liberación de un neurotransmisor en la hendidura sináptica). La mente consciente, según el modelo de Beck y Eccles, se vuelve neuronalmente efectiva al incrementar momentáneamente las probabilidades de la exocitosis.

Finalmente, otro modo de adoptar la física cuántica para dar cuenta de la conciencia, consiste en hacer uso de desarrollos y generalizaciones que van más allá de la física teórica estándar. Algunos candidatos recientes incluyen la posibilidad de ligar la teoría del caos con la no localidad cuántica y aplicarla a las neurociencias para dar cuenta de la conciencia,<sup>15</sup> así como el uso de la teoría de las supercuerdas para explicar la conciencia y la relación mente-cerebro desde un monismo del doble aspecto.<sup>16</sup> Sin embargo, el ejemplo más notable de este

---

esotéricos que utilizan una interpretación de la mecánica cuántica para dar cuenta de fenómenos supuestamente paranormales. En el filme son entrevistados algunos representantes de estos enfoques como el físico indio Amit Goswami, el psiquiatra Jeffrey Satinover e incluso Stuart Hameroff.

<sup>9</sup> Atmanspacher 2004, p. 58.

<sup>10</sup> Haldane 1934.

<sup>11</sup> Wigner 1967.

<sup>12</sup> Stapp 1995, 1997, 2009.

<sup>13</sup> Walker 1970, 2000, 2001.

<sup>14</sup> Beck y Eccles 1992, 2003; Eccles 1986, 1990, 1994.

<sup>15</sup> Véase e.g., King 1996, 2003.

<sup>16</sup> Véase e.g., Godfroid 2003.

tipo de modelos es el de Penrose y Hameroff, cuya propuesta intenta relacionar la conciencia con la reducción de estados cuánticos gravitacionalmente, por lo cual este enfoque requiere el marco de una teoría de la gravedad cuántica, aún por desarrollar.

Se requeriría un trabajo mucho mayor para poder analizar todos estos modelos en profundidad. Por esa razón elegí sólo uno. El candidato más obvio fue el modelo cuántico de Roger Penrose ya que se trata, con toda seguridad, del modelo cuántico más detallado y complejo de la conciencia.

## **1.2. PENROSE, HAMEROFF Y LA FÍSICA DE LA CONCIENCIA**

Roger Penrose —conocido por sus investigaciones en geometría, relatividad, redes no periódicas y los fundamentos de la mecánica cuántica—, probó mediante una serie de teoremas descubiertos con el también conocido físico matemático de Cambridge, Stephen Hawking,<sup>17</sup> que cuando se produce un colapso gravitacional en una estrella de gran masa deviniendo en un agujero negro, toda la masa forma una singularidad, un punto geométrico en el espacio donde la masa se comprime hasta tener una densidad infinita y volumen igual a cero. También probó que el big bang debió ser una singularidad. Así mismo, desarrolló un método para mapear las regiones del espacio-tiempo que rodean a un agujero negro. Tales mapas, llamados diagramas de Penrose, permiten visualizar los efectos de la gravitación sobre una entidad que se aproxima a un agujero negro.

Actualmente Penrose trabaja en el desarrollo de su teoría de los ‘torcionadores’ (en inglés, ‘twistors’), la cual pretende convertirse en el esquema teórico que logre unificar la mecánica cuántica y la relatividad general.<sup>18</sup> Los torcionadores son objetos geométricos abstractos que operan en un espacio complejo multidimensional y que subyacen al espacio-tiempo. El programa de esta teoría implica trasladar las nociones espaciotemporales en la geometría de los torcionadores, la cual es más simple que la geometría espaciotemporal convencional. Según Penrose, la geometría de los torcionadores refleja muchas de las propiedades de la teoría cuántica de campos y de la física de la relatividad especial, pero el desarrollo de la teoría podría involucrar también a la relatividad general, logrando la tan ansiada teoría de la gran unificación.

---

<sup>17</sup> Véase, e.g., Hawking y Penrose 1970.

<sup>18</sup> Penrose 1999b, 2004, cap. 33.

Penrose se ha interesado también en el problema de la conciencia. Al estudio de esta cuestión Penrose ha dedicado ya casi dos décadas desde mediados de los años 1980, tres libros de divulgación que contienen sus ideas al respecto, dos de los cuales se convirtieron en best-seller, así como una veintena de artículos, ensayos y numerosas conferencias en todo el mundo.

Stuart Hameroff, por su parte, se ha especializado en los mecanismos moleculares de los anestésicos generales. Hameroff ha trabajado y ha escrito numerosos artículos sobre la conciencia y sus alteraciones durante la anestesia general, así como los microtúbulos citoesqueléticos en las neuronas y su papel en el surgimiento de la conciencia. En 1987 publicó su libro *Ultimate computing: biomolecular consciousness and nanotechnology*, donde plantea un modelo sobre el procesamiento de información en los microtúbulos.

En abril de 1994 Hameroff y algunos colegas en la Universidad de Arizona, organizaron la primera de una serie de conferencias bianuales que se celebra en la ciudad de Tucson.<sup>19</sup> Hameroff ha promovido también un número de conferencias similares sobre el estudio de la conciencia en varias partes del mundo, como varios países de Europa y Asia. Con apoyo financiero del Instituto Fetzer, Hameroff y sus colegas inauguraron en 1997 el Center for Consciousness Studies en la Universidad de Arizona.

Hameroff y Penrose se reunieron en 1992 y desde entonces han trabajado en el desarrollo del modelo cuántico de la conciencia que integra las ideas de Penrose en la mecánica cuántica y las de Hameroff sobre los microtúbulos. Este modelo empieza con las tesis de Penrose acerca del problema de simular la conciencia en sistemas artificiales.

Penrose desarrolla sus ideas sobre la conciencia en sus libros *The emperor's new mind* de 1989 (a partir de aquí *Emperor*) y *Shadows of the mind* de 1994 (a partir de aquí *Shadows*). La motivación tras sus ideas acerca de la conciencia y la mente la plantea Penrose en *Emperor* diciendo que "...it is our present lack of understanding of the fundamental laws of physics that prevents us from coming to grips with concept of 'mind' in physical or logical terms".<sup>20</sup> También en el prefacio a la edición del décimo aniversario de *Emperor* dice que "...the phenomenon of consciousness cannot be accommodated within the framework of present-day physical theory".<sup>21</sup>

---

<sup>19</sup> Los documentos basados en las primeras tres conferencias ya han sido publicados por Hameroff y sus colaboradores: véase Hameroff, Kaszniak y Chalmers 1999; Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, 1998.

<sup>20</sup> Penrose 1989, p. 4; también en Penrose 1989/1999, pp. 4 y 5.

<sup>21</sup> Penrose 1989/1999, p. xv.

Así pues, toda la concepción de Penrose sobre la conciencia va a girar en torno a dos ideas principales, como lo plantea en una reseña de 1990 a *Emperor*:

...I attempt to put forward a point of view (which I believe to be new) concerning the nature of the physics that might underlie conscious thought processes. As part of my argument, I point out that there could well be room, within physical laws, for an action that is *not algorithmic* — i.e., that cannot be properly simulated by any computer — though I argue that it is likely that such nonalgorithmic action can arise only in an area of physics where there is an important gap in our present physical understanding: the no-man's land between quantum and classical physics. (*Mathematical* processes of a nonalgorithmic kind certainly do exist, but the question I am raising is whether such processes have a role to play in *physics*.) I also argue that there is good evidence that conscious thinking is itself not an algorithmic activity, and that consequently the brain must be making use of nonalgorithmic physical processes in an essential way whenever consciousness comes into play. There must accordingly be aspects of the brain's action that cannot be properly simulated by the action of a computer, in the sense that we understand the term 'computer' today (cursivas en el original).<sup>22</sup>

Para defender estas ideas Penrose utiliza todo un aparato teórico que va a involucrar una diversidad de tópicos: la inteligencia artificial, las máquinas de Turing, el conjunto de Mandelbrot y los números complejos como ejemplo del mundo platónico de las matemáticas, el teorema de incompletitud de Gödel, la teoría del caos, la física cuántica, la termodinámica, el big bang, los agujeros negros y las singularidades. Aunque no ocupan un lugar relevante ni en *Emperor* ni en *Shadows*, hay también algunas ideas sobre la estructura del cerebro, la computación cuántica, la selección natural y los experimentos de retroreferencia temporal de la conciencia de Benjamin Libet.

### 1.3. PLAN DEL TRABAJO

Ya he hablado un poco sobre los modelos cuánticos de la conciencia y he introducido el trabajo de Penrose y Hameroff. En el segundo capítulo del trabajo hago una exposición de su modelo. Para ello hago primero una reconstrucción del mismo dividiéndolo en cuatro partes. Las partes A y B consisten en las tesis de Penrose sobre la no computabilidad de la conciencia. La tercera parte (C) son las ideas de Penrose acerca de por qué el marco de la física teórica actual resulta inadecuado para dar cuenta de la conciencia y su propuesta de la teoría de la gravedad cuántica como concepción no computable. La cuarta parte (D) es el modelo de la

---

<sup>22</sup> Penrose 1990, p. 643; véase también Penrose 1989/1999, p. xvi.

conciencia llamado reducción objetiva orquestada en los microtúbulos, que Penrose desarrolló junto Stuart Hameroff, basado en toda la concepción precedente (A-C).

El tercer capítulo es mi evaluación crítica del modelo de Penrose y Hameroff. Aunque no analizo críticamente todo el modelo, sugiero que éste adolece de cuatro problemas: (i) una alteración del funcionamiento normal de los microtúbulos no se relaciona directamente con perturbaciones de la conciencia, sino con las enfermedades neurodegenerativas; (ii) la coherencia cuántica a gran escala en el cerebro es insuficiente para el surgimiento de la conciencia, ya que una actividad hipersincrónica (a la que subyace una gran coherencia cuántica en los MTs) no corresponde a ningún tipo de actividad consciente, sino a crisis epilépticas generalizadas; (iii) la tesis de las oscilaciones de 40 Hz (que se han postulado como el proceso que subyace al enlace temporal de diversas regiones cerebrales, para dar lugar a una experiencia consciente unificada) tiene algunos problemas metodológicos y teóricos, y no es la única que puede explicar el problema del enlace; y (iv) la hipótesis de Hameroff de que la conciencia depende de procesos cuánticos en los bolsillos hidrofóbicos, los cuales pueden ser inhibidos por anestésicos generales, tiene dos problemas: (1) hay evidencia de que la anestesia general actúa en sitios que no involucran las estructuras microtubulares y (2) durante la anestesia general no sólo la conciencia se ve afectada, sino el resto de las funciones cognoscitivas.

# El modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff: una introducción

---

### 2.1. EL MODELO CUÁNTICO DE PENROSE Y HAMEROFF: UN RESUMEN

Penrose y Hameroff presentaron inicialmente su modelo en la primer conferencia sobre la conciencia en la Universidad de Arizona en Tucson en 1994 y apareció publicado un año más tarde en una réplica<sup>23</sup> a una crítica de Patricia Churchland y Rick Grush a las ideas de Penrose en *Emperor y Shadows*,<sup>24</sup> así como en la compilación de una conferencia sobre dinámica no lineal y neurociencias.<sup>25</sup> El modelo está desarrollado *in extenso* en dos artículos principales: “Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: a model for consciousness”<sup>26</sup> y “Conscious events as orchestrated space-time selections”.<sup>27</sup>

El modelo tiene muchos elementos técnicos bastante abstractos y complejos. Por eso, para no perdernos en todas sus ramas, propongo enseguida una síntesis del mismo y después lo describo con mayor profundidad. Para ello voy a dividir este aparato argumentativo en varias partes que se pueden distinguir claramente.<sup>28</sup> La primera parte (A) consiste en la tesis de la no computabilidad de la conciencia, como la desarrolla Penrose en *Emperor’s new mind*. La segunda (B) es el nuevo argumento que Penrose desarrolló en *Shadows of the mind* (§3.16, §3.23) y en Penrose 1996, para seguir apoyando la tesis de la no computabilidad de la conciencia. La tercera parte (C) son las ideas de Penrose acerca de por qué el marco de la física teórica actual resulta inadecuado para dar cuenta de la conciencia y su propuesta de la teoría de la gravedad cuántica como concepción no computable que logre solventar las dificultades de ese marco teórico. La cuarta parte (D) es el modelo de la conciencia llamado ‘reducción

---

<sup>23</sup> Penrose y Hameroff 1995.

<sup>24</sup> Grush y Churchland 1995.

<sup>25</sup> Véase Hameroff y Penrose 1995; King y Pribram 1995.

<sup>26</sup> Hameroff y Penrose 1995, 1996*b* y 1996*c*.

<sup>27</sup> Hameroff y Penrose 1996*a*, 1997 y 2003.

<sup>28</sup> La crítica desarrollada por la profesora Patricia Churchland y su colega Rick Grush (véase Grush y Churchland 1995, esp., pp. 188, 189) me ha servido como modelo para analizar la propuesta de Penrose y Hameroff. Sin embargo, mi análisis es diferente al de Grush y Churchland, aunque no son incompatibles.

objetiva orquestada en los microtúbulos’, que Penrose desarrolló junto Stuart Hameroff, basado en toda la concepción precedente (A-C).

*A. Tesis de la no computabilidad de la conciencia*

- A1 Hay un algoritmo  $A$  (o sistema formal universal) utilizado por todos los matemáticos para juzgar la verdad matemática.  $A$  es *equivalente* a todos los diferentes algoritmos de los matemáticos para juzgar la verdad matemática.
- A2 Puede haber dos casos: (i) podemos saber que  $A$  es utilizado por los matemáticos para establecer la verdad, o (ii) no podemos saber que  $A$  es utilizado por los matemáticos para establecer la verdad.
- A3 Si (i), entonces *podríamos* construir una proposición gödeliana<sup>29</sup> para  $A$  y saber que también es una verdad matemática.
- A4 Si (ii), entonces  $A$  es tan complicado u oscuro que nunca podremos conocer su propia validez.
- A5 La conciencia es un ingrediente fundamental en nuestra comprensión de la verdad matemática, y en esta comprensión está implicada un tipo especial de ‘visión’ o ‘contemplación consciente’ que requiere un acto de intuición matemática. Este ‘ver’ es la esencia misma de la conciencia.
- A6 Por A5 podemos ‘ver’ que A3 es verdadera y que A4 es falsa, por lo tanto,
- A7 Podemos ‘ver’ que  $A$  es ‘válido’, y por consiguiente:
- A8 A1 es falsa: los matemáticos *no* hacen uso de ningún algoritmo  $A$  para juzgar la verdad matemática, ya que ellos ‘ven’ que A3 es verdadera, A4 es falsa y que  $A$  es ‘válido’.

*Por lo tanto*

- A9 La conciencia es no computable.

---

<sup>29</sup> En el capítulo 4 de *Emperor* (pp. 105-108), Penrose intenta mostrar que para cualquier sistema formal matemático (suficientemente amplio para contener la aritmética y las reglas de inferencia), se puede construir una proposición gödeliana específica  $P_k(k)$ , la cual es un enunciado bien definido acerca de los números y que tiene la siguiente forma: “para cada número natural  $x$ , se sostiene la siguiente propiedad computable de  $x$ .” Sobre este tipo de proposiciones Penrose comenta en la reseña a *Emperor* de 1990: “From the way that  $P_k(k)$  is constructed, one sees, provided that one believes that the axioms and rules of procedure of the formal system are valid methods of deriving mathematical truth, that one must believe that  $P_k(k)$  is a mathematical truth also. Nevertheless,  $P_k(k)$  is not itself derivable by means of the axioms and rules of procedure of the given formal system” (Penrose 1990, p. 653).

## B. ‘Nuevo argumento de Penrose’ a favor de la no computabilidad de la conciencia

Sea  $F$  un sistema formal sólido [*sound*]<sup>30</sup> que puede encapsular todos los métodos humanamente accesibles del irrefutable razonamiento matemático (en breve, ‘yo soy  $F$ ’). Si a un matemático se le presenta  $F$ , entonces puede argumentar del siguiente modo:

- B1 Aunque yo no sepa necesariamente que soy  $F$ , concluyo que si lo fuera, entonces  $F$  tendría que ser sólido. De hecho, yo sé que el sistema mayor  $F'$  tendría que ser también sólido, donde  $F'$  es  $F$  complementado por la aserción adicional ‘yo soy  $F$ ’.
- B2 Yo percibo que de la aserción ‘yo soy  $F$ ’ se sigue que el enunciado gödeliano  $G(F')$  tendría que ser verdadero y, además —vía el resultado de Gödel—, que no tendría que ser una consecuencia de  $F'$ . ( $G(F')$  es la oración gödeliana de  $F'$ ).
- B3 Empero, yo logro percibir justamente que B2 es verdadero (i.e., yo logro percibir que ‘si resultara que soy  $F$ , entonces  $G(F')$  tendría que ser cierto’) y se esperaría que las percepciones de esta naturaleza puedan ser logradas por  $F'$ .
- B4 Dado que por lo tanto yo soy capaz de percibir (vía A3-A8 de la tesis A) algo más allá de los poderes de  $F'$ , se deduce que, después de todo, no puedo ser  $F$  (i.e., no soy un sistema formal). Esto se aplica a cualquier otro sistema (gödelizable) que reemplazara a  $F$ .
- B5 Por B1-B4 se sigue entonces que: “...ningún ser consciente que se percate matemáticamente —esto es, ningún ser capaz de un genuino entendimiento matemático— puede operar de acuerdo con cualquier conjunto de mecanismos que sea capaz de apreciar, sin importar si realmente *sabe* que esos mecanismos son los que supuestamente gobiernan sus propias rutas hacia la verdad matemática irrefutable”. (Penrose 1994, pp. 166, 167)

*Por lo tanto*

B6 La conciencia es no computable.

<sup>30</sup> En general Penrose utiliza los términos ‘sólido’ [*sound*] y ‘solidez’ [*soundness*] para referirse a la ‘consistencia’ de los sistemas formales, i.e., a sistemas formales en los cuales no debería ser posible demostrar tanto una proposición como su negación. Sin embargo, Penrose utiliza el término sólido de modo más específico para referirse a la noción de  $\omega$ -consistencia, la cual es más fuerte que la noción de consistencia. Más adelante (nota 55) veremos qué significa esta noción. Por lo pronto podemos simplemente considerar el concepto de sólido como equivalente al de consistente con respecto a los sistemas formales. En la versión castellana de *Shadows of the mind*, Javier García Sanz tradujo el término inglés *sound* como ‘válido’.

*C. Tesis de la inadecuación de la física actual y de la teoría de la gravedad cuántica como concepción no computable*

- C1 Actualmente no existe una teoría adecuada sobre la ‘reducción’ del vector de estado (o ‘colapso’ de la función de onda), pero una teoría de *reducción objetiva* (RO) vía *gravedad cuántica* podría resultar exitosa para dar cuenta de él.
- C2 Una teoría RO vía gravedad cuántica podría incorporar procesos no computables.
- C3 La existencia de cuasicristales es evidencia de que existen tales procesos no computables.<sup>31</sup>

*Por lo tanto*

- C4 Futuras teorías físicas, en particular una teoría RO vía gravedad cuántica, podría incorporar procesos no computables.

*D. Modelo de reducción objetiva orquestada en los microtúbulos de Hameroff-Penrose*

- D1 Los estados de superposición cuántica se desarrollan en las subunidades proteicas (tubulinas) dentro de los microtúbulos, donde permanecen coherentes y pueden reclutar más tubulinas superpuestas hasta que se alcanza un umbral masa-tiempo-energía (vía gravedad cuántica).
- D2 En esta fase crítica ocurre abruptamente el autocolapso o reducción objetiva (RO).
- D3 Cada fase de prerreducción de superposición coherente (computación cuántica) equivale a un proceso preconsciente y cada autocolapso o RO instantánea (no computable) equivale a un evento consciente discreto.
- D4 Una secuencia de procesos RO da lugar a un ‘flujo’ de conciencia.
- D5 Las proteínas asociadas a microtúbulos pueden ‘sintonizar’ las oscilaciones cuánticas de los estados en superposición coherente; entonces, la RO es *orquestada* (RO Orq) vía las proteínas asociadas a microtúbulos (MAPs).
- D6 Cada evento RO Orq selecciona (no computacionalmente) los estados de las subunidades microtubulares, las cuales regulan las funciones sináptico-neuronales haciendo uso de las señalizaciones clásicas.

---

<sup>31</sup> Más adelante en este capítulo (§ 3) reviso las ideas de Penrose sobre la gravedad cuántica para apoyar estas premisas.

*Por lo tanto*

D7 Debido a que los microtúbulos implican efectos mecánico cuánticos no computables (RO vía gravedad cuántica) y juegan un papel en los sucesos conscientes, ofrecen una vía para dar cuenta de la no computabilidad de la conciencia y su base física.

## 2.2. LA TESIS DE LA NO COMPUTABILIDAD DE LA CONCIENCIA

La primera parte del modelo de Penrose y Hameroff es el desarrollo de una serie de ideas, por parte de Penrose, para demostrar que la actividad mental en general y la conciencia en particular, no son computables. Sin embargo, sus argumentos en *Emperor* y en *Shadows* son diferentes. Por ello la tesis se divide en dos partes, aunque en realidad ambas llegan exactamente a la misma conclusión. El núcleo de esta tesis es el teorema de incompletitud de Gödel y su objetivo de ataque es la llamada inteligencia artificial fuerte (a partir de aquí IA fuerte).<sup>32</sup>

Para poder ubicar su posición teórica, el mismo Roger Penrose propone que hay cuatro puntos de vista principales con respecto a la computabilidad de la conciencia, a los que designa *A, B, C y D*:<sup>33</sup>

- A* All thinking is computation; in particular, feelings of conscious awareness are evoked merely by the carrying out of appropriate computations.
- B* Awareness is a feature of the brain's physical action; and whereas any physical action can be simulated computationally, computational simulation cannot by itself evoke awareness.
- C* Appropriate physical action of the brain evokes awareness, but this physical action cannot even properly simulated computationally.
- D* Awareness cannot be explained by physical, computational, or any other scientific terms.

<sup>32</sup> En un polémico artículo de 1980, el filósofo de Berkeley, John Searle, planteó distinguir entre la IA fuerte y la IA débil. Así definió Searle: According to weak AI, the principal value of the computer in the study of the mind is that it gives us a very powerful tool. For example, it enables us to formulate and test hypotheses in a more rigorous and precise fashion. But according to strong AI, the computer is not merely a tool in the study of the mind; rather, the appropriately programmed computer really is a mind, in the sense that computers given the right programs can be literally said to understand and have other cognitive states. In strong AI, because the programmed computer has cognitive states, the programs are not mere tools that enable us to test psychological explanations; rather, the programs are themselves the explanations (Searle 1980, p. 417).

<sup>33</sup> Penrose plantea estos cuatro puntos de vista en Penrose 1994, p. 12; Penrose 1997a, p. 7; y en Penrose 1997b, p. 101; cf. Searle 1997, pp. 60, 61.

El punto de vista  $\mathcal{A}$  o IA fuerte, afirma que toda la mentalidad es simplemente un programa de cómputo y que, por lo tanto, si el cerebro (o cualquier otro medio físico como chips de silicio, latas de cerveza, trozos de cuerda o la población de China)<sup>34</sup> lleva a cabo los cálculos apropiados, la conciencia será el resultado de tales cálculos. Este punto de vista es sostenido actualmente por algunos investigadores en inteligencia artificial quienes proponen algunos modelos para simular artificialmente la conciencia<sup>35</sup> y es el blanco de los ataques de Penrose.

La postura  $\mathcal{B}$ , también conocido como IA débil, sostiene que, en principio, la acción física del cerebro puede ser simulada artificialmente. La diferencia entre  $\mathcal{A}$  y  $\mathcal{B}$  es que, aunque la actividad cerebral puede ser simulada computacionalmente, la mera simulación no tendría en sí misma, de acuerdo con  $\mathcal{B}$ , ningún sentimiento o conciencia ya que, como bien lo apuntó John Searle, la simulación computacional de un proceso físico, es algo muy diferente del proceso físico en sí; por ejemplo, la simulación por computadora de un avión, no es un avión. Así, un cerebro hecho de neuronas sería consciente, mientras que una simulación exacta de la actividad del cerebro no lo sería.<sup>36</sup>

El punto de vista  $\mathcal{C}$  es el punto que Penrose va a defender en contra de los otros tres, particularmente en contra de  $\mathcal{A}$ . De acuerdo con  $\mathcal{C}$ , y en correspondencia con  $\mathcal{B}$ , hay algo en el cerebro que causa la conciencia, pero a diferencia de  $\mathcal{B}$ , el enfoque  $\mathcal{C}$  sostiene que esta acción física es algo que no puede ser simulado computacionalmente, ya que la acción física del cerebro responsable de causar la conciencia es algo que está más allá de las operaciones de

<sup>34</sup> Chalmers 1996, p. 248; White 1986/1997, p. 695.

<sup>35</sup> Por ejemplo Cleeremans 2005; McDermott 2001; O'Brien y Opie 1999.

<sup>36</sup> Este punto de vista es sostenido por Searle (1980/2004, 1987 y 1997) y por algunos autores que han atacado el funcionalismo en filosofía de la mente como Ned Block y Jerry Fodor (Block 1980a; Block y Fodor 1972). Aunque existen diferentes versiones de este enfoque en la filosofía de la mente (véase e.g., Shoemaker 1981), la versión dominante es la que Ned Block (1980b) llama funcionalismo metafísico y que fue defendida principalmente por David Lewis (1966) y en algún momento por Hilary Putnam (1967/2004). El filósofo de San Diego Paul Churchland define así este enfoque: "According to *functionalism*, the essential or defining feature of any type of mental state is the set of causal relations it bears to (1) environmental effects on the body, (2) other types of mental states, and (3) bodily behavior" (Churchland 1988, p. 36). En el ejemplo clásico, el dolor sería una sensación típicamente causada por un daño que ha sufrido el cuerpo (*input*) y que tiende a provocar en quien lo padece ciertas disposiciones y pautas conductuales, como quejarse, huir, etcétera (*output*), y que suele suscitar el deseo de librarse de él (otros estados internos). Un aspecto interesante del enfoque funcionalista es que lo que importa de los estados mentales es su naturaleza funcional, más no su naturaleza física subyacente, i.e., según el funcionalismo los estados mentales pueden ser físicamente instanciados o realizados de forma múltiple, de acuerdo con el principio de realizabilidad múltiple (Kim 1993), según el cual, no interesa si la organización funcional está compuesta de neuronas, chips de silicio, latas de cerveza, pelotas de ping-pong o la población china, lo que importa es la organización funcional abstracta como tal de cualesquiera de estos substratos físicos. Dado que en la descripción lógica de una máquina de Turing no se incluye ninguna especificación sobre su naturaleza física —ya que se trata de una máquina abstracta—, ésta cumple el principio de realizabilidad múltiple.

cómputos o algoritmos.<sup>37</sup> Así, según Penrose  $\mathcal{E}$  es un punto de vista más operacional que  $\mathcal{B}$ , ya que “...it asserts that there are external manifestations of conscious objects (say, brains) that differ from external manifestations of a computer: the outward effects of consciousness cannot be properly simulated computationally”.<sup>38</sup>

De acuerdo con Penrose, el punto  $\mathcal{E}$  admite por lo menos dos variedades a las que llama  $\mathcal{E}$  débil y  $\mathcal{E}$  fuerte. Según  $\mathcal{E}$  débil, la física conocida actualmente resulta suficiente para encontrar ciertos tipos de actividad que son no computables para dar cuenta de la conciencia. Por el contrario, según  $\mathcal{E}$  fuerte, para poder dar cuenta de la conciencia en términos no computacionales, se requiere ir más de la física conocida, ya que ésta es inadecuada e incompleta para tal objetivo.  $\mathcal{E}$  fuerte es precisamente el punto de vista que defiende Penrose.

Finalmente, el punto de vista  $\mathcal{D}$  niega por completo una visión fisicista de la conciencia y la considera como algo fuera del alcance de las explicaciones científicas, por lo cual, según Penrose, “...is the viewpoint of the mystic; and at least some ingredient of  $\mathcal{D}$  seems to be involved in the acceptance of religious doctrine”.<sup>39</sup> Penrose no está de acuerdo con esta posición y opina que aunque por el momento la ciencia es incapaz de decir algo que tenga significado con respecto a la mente y la conciencia, con el tiempo una ciencia y una matemática ampliadas podrán acomodar estas cuestiones.

### 2.2.1. La no computabilidad de la conciencia

La mayor parte de los críticos se han quejado por el hecho de que Penrose dedica sólo muy pocas páginas de sus trabajos a sus tesis centrales. En el caso de la tesis de la no computabilidad de la conciencia en *Emperor*, aunque Penrose alude a su conclusión en varias ocasiones a lo largo del libro, el argumento principal sólo aparece hasta el último capítulo<sup>40</sup> y además resulta un tanto oscuro. Básicamente, Penrose sostiene que el teorema de incompletitud de Gödel implica que la mente consciente de los matemáticos —y por extensión, todos los seres humanos— no son programas de computadora.

<sup>37</sup> Penrose dedica un capítulo entero de *Emperor* (cap. 2, pp. 30-73) a revisar el concepto de algoritmo, pero en *Shadows* define algoritmo de un modo sencillo “...an algorithm is just a computational procedure—the action of some Turing machine” (Penrose 1994, p. 29). En una página previa de *Shadows* (p. 17), Penrose dice que tomará el concepto de algoritmo como sinónimo del concepto de cómputo o computación.

<sup>38</sup> Penrose 1994, p. 15.

<sup>39</sup> Penrose 1994, p. 12.

<sup>40</sup> Únicamente en un par de páginas (416-418) de las más de 450 que lo conforman.

Hacia finales del siglo XIX, Bertrand Russell, David Hilbert y otros matemáticos propusieron algunos sistemas muy precisos de axiomas y reglas de procedimiento, llamados sistemas formales, con la intención de que éstos incorporaran todas las reglas de inferencia. Si estos sistemas debían ser exitosos, entonces cualquier proposición matemática verdadera debería ser demostrable con los procedimientos que yacen en el sistema formal (completitud) y, además, no debería ser posible demostrar tanto una proposición como su negación (consistencia). Esto condujo al enfoque llamado *formalismo*, de acuerdo con el cual toda la matemática podía ser reducida a reglas para manipular fórmulas sin hacer ninguna referencia al significado de las fórmulas. Los formalistas sostenían que son los símbolos matemáticos por sí solos y no cualquier significado que se les pueda atribuir, los que constituyen los objetos básicos del pensamiento matemático.

En 1931, el lógico matemático austriaco Kurt Gödel (1906-1978) publicó un trabajo en el cual demolía el formalismo. Gödel demostró que en cualquier sistema formal consistente que sea lo suficientemente amplio para contener la aritmética y las reglas de inferencia, se pueden construir enunciados matemáticos, del tal modo que ni ellos ni sus negaciones no sean demostrables dentro del sistema formal. Así, el sistema no puede ser completo en el sentido en que lo requerían Hilbert y otros. Y Penrose añade:

Worse than this ... by the very way that such a Gödel proposition is constructed we can *see*, using our insight and understanding about what the symbols in the formal system are supposed to mean, that the Gödel proposition is actually *true!* This tells us that the very concepts of truth, meaning, and mathematical insight cannot be encapsulated within any formalist scheme.

This is not just bad news for the formalists. It is bad news for strong-AI, as well. For there is a very close relationship between the concept of an algorithm and the concept of a formal system, with regard to mathematical statements. For any formal system, there is always an algorithm that generates precisely all the propositions that can be proved within that system. Conversely, given an algorithm for generating mathematical statements, one can always construct a formal system that incorporates all these statements as axioms of the system. This tells us that mathematical truth is not an algorithmic matter. It also appears to tell us that meaning and insight are not algorithmic matters either.<sup>41</sup>

En *Emperor* Penrose dice que:

...a good part of the reason for believing that consciousness is able to influence truth-judgements in a non-algorithmic way stems from considerations of Gödel's theorem. If we can see that the role of consciousness is non-algorithmic when forming mathematical judgements,

---

<sup>41</sup> Penrose 1990, p. 648.

where calculation and rigorous proof constitute such an important factor, then surely we may be persuaded that such a non-algorithmic ingredient could be crucial also for the role of consciousness in more general (non-mathematical) circumstances.

En un artículo aparecido dos años antes de *Emperor*, Penrose presentaba ya su argumento sobre la no computabilidad de la conciencia en los siguientes términos:

...What Gödel's argument *seems* to show is that the way in which we decide that mathematical statements are true is not algorithmic. It most definitely does show that there is no algorithmic procedure (a Turing machine) which can generate *all* the true propositions of arithmetic and no false ones ... But why, then, can one not simply get a computer also to follow this Gödel argument and itself 'see' the truth of any new Gödel proposition? ... The trouble is that the computer does not have a way of judging truth; it is only following rules. It does not 'see' the validity of the Gödel argument. It does not 'see' *anything* unless it is conscious! It seems to me that in order to appreciate the validity of the Gödel procedure — or, indeed, to *see* the validity of *any* mathematical procedure — one must be conscious (cursivas en el original).<sup>42</sup>

El argumento de Penrose no es del todo original. El matemático John R. Lucas fue el primero —casi treinta años antes que Penrose— en proponer un argumento basado en el teorema de incompletitud de Gödel para refutar la idea de que la mentalidad puede ser simulada computacionalmente. Ahora, dado que Penrose mismo refiere tanto a Lucas como algunos de sus críticos, se presume que su formulación es un refinamiento y una mejora del argumento original de Lucas. Lucas establece su argumento de una manera sencilla en su famoso artículo 'Minds, machines and Gödel' de 1961:

Gödel's theorem must apply to cybernetical machines, because it is of the essence of being a machine, that it should be a concrete instantiation of a formal system. It follows that given any machine which is consistent and capable of doing simple arithmetic, there is a formula which it is incapable of producing as being true—i.e., the formula is unprovable-in-the-system—but which we can see to be true. It follows that no machine can be a complete or adequate model of the mind, that minds are essentially different from machines.<sup>43</sup>

Penrose sugiere que el argumento de Lucas no es del todo suficiente para demostrar que la conciencia es no computable. Penrose reconstruye entonces el argumento de Lucas, pero primero propone que existe una equivalencia entre el concepto de sistema formal y el concepto de algoritmo. Vuelvo otra vez a una cita anterior en la cual dice Penrose que:

---

<sup>42</sup> Penrose 1987, p. 270.

<sup>43</sup> Lucas 1961, p. 113.

...there is a very close relationship between the concept of an algorithm and the concept of a formal system, with regard to mathematical statements. For any formal system, there is always an algorithm that generates precisely all the propositions that can be proved within that system. Conversely, given an algorithm for generating mathematical statements, one can always construct a formal system that incorporates all these statements as axioms of the system. This tells us that mathematical truth is not an algorithmic matter; it also appears to tell us that meaning and insight are not algorithmic matter either.<sup>44</sup>

Penrose pasa entonces a reconstruir el argumento de Lucas y a mostrar por qué le parece insuficiente:

...suppose that a particular mathematician is using some algorithm — that is, in effect, some formal system  $F$  — as his means of ascertaining mathematical truth. Then the Gödel proposition  $Pk(k)$  constructed from  $F$  must be a true proposition also, though it is not possible for our putative algorithmic mathematician to ascertain the truth of  $Pk(k)$ . This is essentially the argument put forward by Lucas (1961), but it is not yet the desired contradiction, since the mathematician can have no means of knowing what  $F$  is, let alone be convinced of its validity as a means of ascertaining truth. We shall need a broader argument than this.<sup>45</sup>

Habiendo reconstruido de esta forma el argumento original de Lucas, Penrose va a utilizar un argumento de reducción al absurdo, y lo que va a reducir a la absurdidad es lo siguiente: “Let us suppose ... that the ways that human mathematicians form their conscious judgements of mathematical truth are indeed algorithmic. We shall try to reduce this, by use of Gödel’s theorem, to an absurdity”.<sup>46</sup> Parecería aquí como si Penrose estuviera hablando de varios algoritmos. Sin embargo, esto no es lo que quiere dar a entender ya que, además del hecho de que su argumento requiere un único algoritmo, Penrose habla constantemente del algoritmo de cada matemático en singular.<sup>47</sup> Además, el algoritmo del matemático y el algoritmo de otro matemático deben ser equivalentes, ya que:

...we are not talking about various obscure algorithms that might happen to be running around in different particular mathematician’s heads. We are talking about *one* universally employed formal system which is *equivalent* to *all* the different mathematicians’ algorithms for judging mathematical truth. Now this putative ‘universal’ system, or algorithm, cannot ever be known as the one that we mathematicians use to decide truth! For if it were, then we *could* construct its Gödel proposition and know that to be a mathematical truth also. Thus, we are

---

<sup>44</sup> Penrose 1990, p. 648.

<sup>45</sup> Penrose 1990, p. 653; también Penrose 1989, pp. 116-118.

<sup>46</sup> Penrose 1989, p. 417; también en Penrose 1990, p. 653.

<sup>47</sup> Dice por ejemplo (Penrose 1989, p. 417): “...we should need to *know* what the mathematician’s algorithm really is, and also to be convinced of its validity as a means of arriving at mathematical truth.”

driven to the conclusion that the algorithm that mathematicians actually use to decide mathematical truth is so complicated or obscure that its very validity can never be known to us (cursivas en el original).<sup>48</sup>

Estas aclaraciones de Penrose muestran que el supuesto que será reducido al absurdo implica *un* sistema formal o algoritmo y que si todos los matemáticos son en cierto sentido equivalentes entonces, como sostiene Penrose, si un matemático acepta algo debería ser exactamente igual para un segundo matemático. Y así continúa Penrose para llegar a la conclusión de que la conciencia no es computable (lo cito *verbatim*):

But this flies in the face of what mathematics is all about! The whole point of our mathematical heritage and training is that we do *not* bow down to the authority of some obscure rules that we can never hope to understand. We must *see*—at least in principle—that each step in an argument can be reduced to something simple and obvious. Mathematical truth is not a horrendously complicated dogma whose validity is beyond our comprehension. It is something built up from simple and obvious ingredients—and when we understand them, their truth is clear and agreed by all.

To my thinking, this is as blatant a *reductio ad absurdum* as we can hope to achieve, short of an actual mathematical proof! The message should be clear. Mathematical truth is *not* something that we ascertain merely by use of an algorithm. I believe, also, that our *consciousness* is a crucial ingredient in our comprehension of mathematical truth. We must ‘see’ the truth of a mathematical argument to be convinced of its validity. This ‘seeing’ is the very essence of consciousness. It must be present *whenever* we directly perceive mathematical truth. When we convince ourselves of the validity of Gödel’s theorem we not only ‘see’ it, but by so doing we reveal the very non-algorithmic nature of the ‘seeing’ process itself (las cursivas son del original).<sup>49</sup>

Además de este argumento para demostrar que la conciencia no es computable, Penrose presenta otro argumento que puede utilizarse, según él mismo, aún en ausencia de argumentos a favor de algún ingrediente no algorítmico en la conciencia, como el argumento de Lucas o el suyo propio. De acuerdo con Penrose,<sup>50</sup> si la acción del cerebro, ya sea consciente o inconsciente, fuera la ejecución de algún algoritmo, entonces se presenta la cuestión de cómo surgió tal algoritmo. La respuesta, según Penrose, es que para el enfoque de la IA fuerte este algoritmo debió surgir merced a un proceso de *selección natural de algoritmos*. Penrose opina que esta idea tiene dificultades, pues no funcionaría para las especificaciones de una máquina de Turing, ya que una ‘mutación’ haría que tal máquina se volviera completamente inútil, en

<sup>48</sup> Penrose 1989, pp. 417, 418; también en Penrose 1990, p. 654.

<sup>49</sup> Penrose 1989, p. 418; también en Penrose 1990, p. 654.

<sup>50</sup> Penrose 1989, pp. 414 y sigs.; también Penrose 1990, p. 654.

lugar de alterarla ligeramente. Además, un proceso de selección natural de algoritmos que dependiera únicamente de la salida de un algoritmo, sería totalmente ineficiente.

### 2.2.2. El nuevo argumento de Penrose a favor de la no computabilidad de la conciencia

El primer argumento sobre la no computabilidad de la conciencia que Penrose presentó en *Emperor*, recibió una considerable cantidad de críticas.<sup>51</sup> Como respuesta a muchas de estas objeciones, Penrose publicó su segundo famoso libro, *Shadows of the mind*, donde desarrolla *ad nauseam* una serie de aclaraciones, refinamientos y extensiones de su argumento original. Mientras que solo un par de páginas de *Emperor* están dedicadas a su argumento central, cerca de 200 páginas de *Shadows* están consagradas prácticamente al segundo argumento de Penrose a favor de la no computabilidad de la conciencia. Sin embargo, el núcleo del argumento se presenta en los párrafos 3.16 y 3.23. En un debate de 1996 sobre el libro de Penrose en la revista electrónica *Psyche*, Penrose presenta un argumento un tanto diferente al de *Shadows*, pero que llega a la misma conclusión. El conjunto de estos dos argumentos ahora es conocido entre los críticos como el ‘nuevo argumento de Penrose’.<sup>52</sup>

El argumento de Penrose en *Shadows* parte de lo que él mismo denomina argumento de Turing-Gödel, el cual ha tenido como una de sus consecuencias el llamado problema de la finalización (*Entscheidungsproblem*), que puede ser definido de la siguiente manera: dada la descripción de un algoritmo y su entrada inicial, determinar si cuando se ejecuta el algoritmo sobre esta entrada, éste finaliza o por el contrario, sigue corriendo sin detenerse.

Una relación entre el problema de la finalización y el teorema de Gödel, es que de hecho es el primer problema para el cual se ha probado que es indecidible. Una consecuencia de esta indecidibilidad es que este problema es irresoluble y, de manera particular, que no puede haber un algoritmo general que decida si un enunciado determinado acerca de los números naturales es verdadero o falso. La razón de esto es que la proposición que establece que un cierto algoritmo finalizará dada una cierta entrada puede ser reformulada automáticamente como un enunciado acerca de los números. Turing demostró que dado que no hay un algoritmo que pueda decidir si el enunciado original acerca de los algoritmos es verdadero o falso, se sigue

---

<sup>51</sup> Véase por ejemplo los numerosos comentarios que siguieron a la reseña de Penrose de su libro *Emperor* en la revista *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 13, pp. 643-705, 1990. Otras reseñas y comentarios críticos se encuentran en Barr 1990; Blank 2000; Clark 1990; Masters 1990; McCarthy 1998; Robinson 1992; Weschler 1990; Zurek 1990.

<sup>52</sup> e.g., Alonso 2001; Bringsjord y Xiao 2000; Lindström 2001; Shapiro 2003.

que no hay un algoritmo que pueda decidir si el enunciado correspondiente acerca de los números es falso o verdadero. La conclusión general es que no existe un algoritmo general para resolver el problema de la finalización para todas las posibles entradas.

Éste el argumento de Turing-Gödel del cual se va a servir Penrose para justificar la tesis  $\mathcal{G}$ , de acuerdo con la cual:

$\mathcal{G}$  Human mathematicians are not using a knowably sound algorithm in order to ascertain mathematical truth.<sup>53</sup>

Ahora, ¿cómo utiliza Penrose la irresolubilidad del problema de la finalización para demostrar que los humanos no usamos un algoritmo cognosciblemente sólido para afirmar la verdad matemática? Con ‘cognosciblemente sólido’ Penrose<sup>54</sup> se refiere a que mientras nosotros *sepamos* que un conjunto de procedimientos computacionales  $A$  es sólido (i.e.,  $\omega$ -consistente),<sup>55</sup> entonces sabemos que hay ciertos algoritmos o cómputos,  $C_k(k)$ , que no finalizan.<sup>56</sup> Pero la prueba de la irresolubilidad del problema de la finalización demuestra que el conjunto de algoritmos computacionales  $A$  es insuficiente para afirmar que el cómputo  $C_k(k)$ , que no finaliza. Así,  $A$  no puede encapsular nuestro entendimiento matemático. Dado que  $A$  puede ser cualquier conjunto de algoritmos computacionales, se sigue que no somos computadoras que llevan a cabo un algoritmo.

Y entonces Penrose concluye:

---

<sup>53</sup> Penrose 1994, p. 76.

<sup>54</sup> Penrose 1994, p. 75.

<sup>55</sup> Como lo había adelantado en la nota 30, la noción de  $\omega$ -consistencia es más fuerte que la noción de consistencia, ya que exige que si  $\sim\forall n[P(n)]$  es demostrable por los métodos de un sistema formal  $F$ , entonces no debe darse el caso de que todos los enunciados ( $P(0), P(1), P(2), P(3), P(4), \dots$ ) sean demostrables dentro de  $F$  (aquí  $P(n)$  es una proposición que depende del número natural  $n$  y  $\forall n[P(n)]$  denota ‘para todo número natural  $n$ ,  $P(n)$  se satisface’). Según Penrose 1994, p. 91, de esto se sigue que si  $F$  no fuera  $\omega$ -consistente, se presentaría la situación anómala en la cual, para algún  $P$ , pudiera demostrarse cada uno de los  $P(0), P(1), P(2), P(3), \dots$ ; sin embargo, dice Penrose (*loc cit.*), “...the statement claiming to assert that *not* all of these hold true is *also* provable!” por lo cual ningún sistema formal confiable podría admitir anomalías de este tipo. Así, si  $F$  es sólido, entonces ciertamente es  $\omega$ -consistente. El matemático Barkley Rosser (1936, 1937 y 1939), quien también contribuyó notablemente a la teoría de los números y a la matemática aplicada, debilitó la hipótesis de la  $\omega$ -consistencia para convertirla sólo en consistencia, a expensas de complicar algo más enunciados como ‘este enunciado no se puede probar en el sistema’. De manera más exacta, Gödel mostró que, si un sistema es consistente, entonces un enunciado  $p$  no se puede probar en el sistema; si el sistema es  $\omega$ -consistente, entonces  $\sim p$  tampoco se puede probar en el sistema.

<sup>56</sup> Un algoritmo o cómputo  $C_k(k)$  sería el  $k$ -ésimo cómputo ejecutado sobre el número  $k$ . Por ejemplo, si  $k$  fuera igual a 8, entonces  $C_k(k)$  sería el octavo cómputo sobre el número 8.

We deduce that no knowably sound set of computational rules (such as  $A$ ) can ever suffice for ascertaining that computations do not stop, since there are some non-stopping computations (such as  $C_k(k)$ ) that must elude these rules. Moreover, since from the knowledge of  $A$  and of its soundness, we can actually construct a computation  $C_k(k)$  that we can see does not ever stop, we deduce that  $A$  cannot be a formalization of the procedures available to mathematicians for ascertaining that computations do not stop, no matter what  $A$  is (cursivas en el original).<sup>57</sup>

En el capítulo 3 de *Shadows*, Penrose intenta eliminar la posibilidad que queda, a saber, que *hay* un algoritmo —pero un algoritmo no cognosciblemente sólido, i.e., que no sabemos que es  $\omega$ -consistente— para clasificar los cómputos como no-finalizadores. Así, especialmente en los párrafos 3.16 y 3.23, Penrose presenta un nuevo e ingenioso argumento cuyo objetivo es demostrar que el matemático ideal no puede creer de modo consistente que un determinado algoritmo pueda enumerar los enunciados aritméticos demostrables, incluso los enunciados conocidos como  $\Pi_1$ -enunciados.<sup>58</sup> En §3.16, Penrose lanza su argumento en términos de un robot hipotético que está contemplando una hipótesis  $M$  de acuerdo con la cual “los mecanismos  $M$  subyacen al entendimiento matemático del robot”.<sup>59</sup> La línea argumental de Penrose resulta un tanto engorrosa, pero el resultado es simplemente que:

...no mathematically aware conscious being—that is, no being capable of genuine mathematical understanding—can operate according to any set of mechanisms that it is able to appreciate, irrespective of whether it actually *knows* that those mechanisms are supposed to be the ones governing its own routes to unassailable mathematical truth.<sup>60</sup>

Las siguientes páginas (167-178) están dedicadas a defender este argumento de una manera algo compleja, pero los argumentos centrales están expuestos en §3.23, el cual consiste en un diálogo ficticio con un matemático robot del futuro.

En su respuesta a las diferentes revisiones de *Shadows* en un simposio en la revista electrónica *Psyche*, Penrose ofrece una versión un tanto distinta a la de *Shadows* en §3.13 y §3.23, y en la cual elimina la premisa de que el algoritmo sea ‘cognosciblemente sólido’, como

---

<sup>57</sup> Penrose 1994, pp. 75, 76.

<sup>58</sup> Los  $\Pi_1$ -enunciados, como los lógicos y matemáticos los llaman técnicamente, son enunciados del tipo ‘tal-y-cual cómputo nunca finaliza’. Para su argumentación, Penrose hace uso de una notación particular. Dos notaciones especiales de las que se sirve para sus argumentos principales son: ‘ $G(F)$ ’ y ‘ $\Omega(F)$ ’ que, respectivamente, son las afirmaciones ‘el sistema formal  $F$  es consistente’ y ‘el sistema formal  $F$  es  $\omega$ -consistente’. Entonces, para cualquier sistema formal  $F$ ,  $G(F)$  es un  $\Pi_1$ -enunciado, pero no  $\Omega(F)$ .

<sup>59</sup> Penrose 1994, p. 165 (§3.16).

<sup>60</sup> Penrose 1994, pp. 166, 167.

lo hacía en el libro, es decir, suprime la premisa que implica que nosotros *sabemos* que el algoritmo es  $\omega$ -consistente. Simplemente sugiere que nuestras capacidades matemáticas humanas pueden ser encapsuladas en algún algoritmo y entonces deriva una contradicción a partir de esa hipótesis. Como dice John Searle: “In short, [Penrose] presents a *reductio ad absurdum* argument: assume I am a computer carrying out a computer algorithm and you will be able to derive a contradiction from that assumption”.<sup>61</sup> He aquí esta versión modificada del argumento (lo cito *verbatim*):

We try to suppose that the totality of methods of (unassailable) mathematical reasoning that are in principle humanly accessible can be encapsulated in some (not necessarily computational) sound formal system  $F$ . A human mathematician, if presented with  $F$ , could argue as follows (bearing in mind that the phrase “I am  $F$ ” is merely a shorthand for “ $F$  encapsulates all the humanly accessible methods of mathematical proof”): (A) “Though I don’t know that I necessarily am  $F$ , I conclude that if I were, then the system  $F$  would have to be sound and, more to the point,  $F'$  would have to be sound, where  $F'$  is  $F$  supplemented by the further assertion “I am  $F$ ”. I perceive that it follows from the assumption that I am  $F$  that the Gödel statement  $G(F')$  would have to be true and, furthermore, that it would not be a consequence of  $F'$ . But I have just perceived that “if I happened to be  $F$ , then  $G(F')$  would have to be true”, and perceptions of this nature would be precisely what  $F'$  is supposed to achieve. Since I am therefore capable of perceiving something beyond the powers of  $F'$ , I deduce that, I cannot be  $F$  after all. Moreover, this applies to any other (Gödelizable) system, in place of  $F$ .<sup>62</sup>

Concuerdo con Searle en que esta versión de *Psyche* es la más sucinta de todo el argumento de Penrose a favor de la no computabilidad de la conciencia.

### 2.3. REDUCCIÓN DEL VECTOR DE ESTADO VÍA GRAVEDAD CUÁNTICA

Un ingrediente del modelo de la conciencia de Penrose y Hameroff es la física cuántica, en particular una versión no computable de ella. ¿Por qué el uso de la física cuántica? En *Emperor*, Penrose discute algunas ideas que se han propuesto acerca de diferentes sistemas y actividades cerebrales que podrían subyacer a la conciencia. De acuerdo con Penrose, todas estas propuestas operan, en principio, bajo el amparo de la física clásica, excepto cuando es necesario apelar a fenómenos físicos cuyas causas implícitas subyacentes son fenómenos cuánticos (e.g., iones y su carga eléctrica, compuertas de sodio y potasio, potenciales químicos, estructura química de los neurotransmisores, etc.). Sin embargo, al ser descritos en términos

---

<sup>61</sup> Searle 1997, p. 68.

<sup>62</sup> Penrose 1996, §3.2.

clásicos, los fenómenos cerebrales son también computables ya que, para Penrose, la física clásica también es computable. Pero habiendo demostrado que la conciencia es no computable, Penrose se pregunta entonces si puede haber algún papel específico que alguna versión no computable de la mecánica cuántica juegue en la conciencia, y espera que un nuevo esquema de la física cuántica que él desarrolla llamado gravedad cuántica, podría conducirnos a algo “genuinamente no-computable”.<sup>63</sup>

La evidencia teórica y empírica en los años 1930, condujo a algunos teóricos como Erwin Schrödinger<sup>64</sup> y el matemático John von Neumann,<sup>65</sup> entre otros, a postular que las superposiciones cuánticas persisten de manera indefinida en el tiempo y que podrían, en principio, ser mantenidas de los niveles microscópico al macroscópico. Asumieron también que la reducción del vector de estado —también se le llama colapso de la función de onda— ocurre efectivamente cuando un sistema cuántico interactúa con su ambiente, incluyendo el ser medido u observado por un ser consciente. De acuerdo con esta imagen, incluso los objetos macroscópicos, si no son observados por un ser consciente, podrían mantenerse en superposiciones cuánticas. Para ilustrar esta idea aparentemente absurda, Schrödinger<sup>66</sup> introdujo su famosa *paradoja del gato*.

Algunos enfoques no toman la reducción del vector de estado o proceso R (en términos de Penrose) como un proceso real. Por ejemplo, en la llamada *interpretación de los muchos mundos* desarrollada por el físico Hugh Everett III,<sup>67</sup> si no hay reducción, entonces cada uno de los términos en la superposición del vector de estado total *es* real, o en otros términos, *todos* los resultados experimentales se llevan a cabo. ¿Qué significa esto? Según Everett, cuando un sujeto lleva a cabo una observación o una medición, el acto de medición hace que el universo se *divida* en dos universos separados. En uno de estos universos, el observador mide, registra y obtiene uno y sólo un resultado de la medición. Empero, en el otro universo el mismo observador mide, registra y obtiene uno y sólo un resultado. Aplicado a la paradoja del gato de Schrödinger, la dificultad parece resolverse: no es que el gato esté en una bizarra superposición de muerto + vivo, sino que en una bifurcación está muerto y en otra está vivo.

---

<sup>63</sup> Penrose 1994, p. 356.

<sup>64</sup> Schrödinger 1935/1980.

<sup>65</sup> von Neumann 1955.

<sup>66</sup> Schrödinger *Ibíd.*

<sup>67</sup> Everett 1957. La interpretación de Everett constituye el origen de lo que hoy día ha pasado ya incluso a formar parte de la *vox populi*, a saber, los famosos ‘universos paralelos’; véase e.g., Tegmark 2003.

Con mediciones sucesivas, el universo (observador incluido), continua dividiéndose como si fuera un árbol al que le van saliendo más y más ramas o bifurcaciones. En cada una de estas ramas, el observador registra una diferente secuencia de eventos y obtiene resultados diferentes. Dado que cada estado particular del observador no percibe que el universo se esté bifurcando, los resultados parecen completamente consistentes con la noción de que el vector de estado inicial del sistema cuántico que se está midiendo, se redujo en uno u otro de los estados de medición.

Ahora bien, ¿por qué el observador no puede ‘sentir’ o ‘experimentar’ que el universo se bifurca al momento de la medición? La respuesta que ofrecen algunos teóricos que han reconstruido la formulación de Everett,<sup>68</sup> es que las leyes de la mecánica cuántica simplemente no permiten que el observador haga este tipo de observación. Bryce DeWitt, por ejemplo,<sup>69</sup> argumenta que si la escisión del universo fuera observable, entonces debería ser posible en principio establecer un segundo dispositivo de medición para obtener un resultado a partir de la memoria del primer dispositivo, el cual difiere del resultado obtenido por su propia observación directa.

En otros enfoques teóricos que veremos enseguida, la reducción del vector de estado, se toma como un fenómeno real, pero las reglas de la mecánica cuántica se modifican por la inclusión de algún procedimiento adicional cuya función es, precisamente, provocar la reducción del vector de estado, debido a cierto umbral o rasgo objetivo, esto es, que **R** ocurre sin la misteriosa intervención de ningún proceso subjetivo por parte del observador y que además ocurre de manera espontánea. Algunos teóricos han sugerido por ejemplo que **R** ocurre debido a un número crítico de partículas superpuestas,<sup>70</sup> mientras que otros autores han propuesto que **R** se debe a ciertos efectos gravitacionales.<sup>71</sup>

Lo esencial de estas propuestas (y no sólo de aquellas que apelan a efectos gravitacionales) es que consideran que la reducción del vector de estado tiene lugar de modo objetivo y espontáneo, en oposición a la evolución unitaria de la función de onda. De acuerdo con ello, cuando se lleva a cabo una medición en un sistema, sus entrelazamientos con el mundo externo son de hecho cortados, de manera tal que se elimina el problema de la persistencia de

---

<sup>68</sup> e.g., DeWitt 1973; Kerr 1976.

<sup>69</sup> DeWitt 1973.

<sup>70</sup> e.g., Ghirardi, Rimini y Weber 1986.

<sup>71</sup> e.g., Károlyházy, Frenkel y Lukács 1986.

complicados entrelazamientos de un sistema con el resto del universo.<sup>72</sup> A la reducción del vector debido a un umbral objetivo Penrose la llama entonces reducción objetiva ó RO.

Las propuestas específicas que apelan a efectos gravitacionales en la reducción del vector de estado, forman parte de un programa teórico mayor que intenta unificar la mecánica cuántica y la relatividad general. A este programa teórico se le conoce en la comunidad de físicos y matemáticos como gravedad cuántica.

Desde hace décadas, los físicos han desarrollado un considerable número de complicados procedimientos matemáticos para unificar la mecánica cuántica con la relatividad general. Hacia los años 1960 y 1970, los cálculos de algunos teóricos parecieron mostrar que estas dos teorías simple y sencillamente no pueden ser combinadas exitosamente. Consecuentemente, algo fundamentalmente nuevo parecía requerirse, por ejemplo postulados o principios adicionales que no están incluidos en las versiones estándar de las dos teorías, nuevas partículas, campos o entidades de alguna clase.

Las propuestas de los teóricos son muy variadas. Por ejemplo el físico de Waterloo, Ontario, Lee Smolin y sus colegas, han desarrollado lo que llaman gravedad cuántica de bucles [*loop quantum gravity*].<sup>73</sup> En esta teoría, los estados cuánticos del espacio que son permitidos se relacionan con diagramas de líneas o nodos llamados redes cuánticas de espín, introducidas por el propio Roger Penrose a principios de los años 1970.<sup>74</sup> El espacio-tiempo cuántico corresponde a diagramas similares llamados espumas de espín [*spin foams*]. La gravedad cuántica de bucles predice que el espacio viene en trozos discretos, los más pequeños de los cuales son de longitud cúbica de Planck ( $10^{-99}$  cm<sup>3</sup>) mientras que el tiempo procede en pulsos o tic-tacs discretos de tiempo de Planck ( $10^{-43}$  seg.). Según los teóricos, los efectos de esta estructura espaciotemporal discreta podrían verse en experimentos en el futuro cercano.

Otro enfoque que se hecho popular entre muchos físicos es la teoría de cuerdas,<sup>75</sup> de acuerdo con la cual las partículas de materia no son como puntos de dimensión cero, sino diminutos filamentos unidimensionales llamados supercuerdas. El tamaño de estas cuerdas es

---

<sup>72</sup> El entrelazamiento es un fenómeno en el cual los estados cuánticos de, digamos, dos sistemas (e.g., dos partículas subatómicas) se superponen, de tal manera que los sistemas entrelazados se comportan como si estuvieran unidos, sin importar cuan lejos estén uno del otro. El entrelazamiento cuántico conduce a las llamadas correlaciones entre las propiedades de los sistemas físicos, por ejemplo, en ciertas condiciones experimentales es posible poner a dos partículas en un mismo estado cuántico, de tal modo que si se lleva a cabo una medición en una partícula, se puede saber el estado de la otra partícula —aunque se encuentren a una gran distancia una de la otra— debido a que se encuentran en un estado entrelazado.

<sup>73</sup> Markopoulou y Smolin 2004; Smolin 2004.

<sup>74</sup> Penrose 1971.

<sup>75</sup> Green y McMaster 2003; Green 1999.

de aproximadamente la escala de Planck ( $10^{-33}$  cm), la distancia mínima posible en el espacio-tiempo. De acuerdo con esta teoría, las diferentes vibraciones de estas diminutas cuerdas crean los diversos tipos de partículas elementales. Existen al menos cinco versiones de esta teoría y su conjugación en un solo modelo se ha llamado teoría M.<sup>76</sup> Aunque esta teoría posee una elegancia matemática reconocida por la comunidad de físicos, por el momento la teoría no puede ser probada experimentalmente, debido a que plantea ciertas cuestiones problemáticas para las cuales no existe evidencia empírica. Por ejemplo, la teoría predice la existencia de un gran número de nuevas partículas y fuerzas elementales, además de requerir de 11 dimensiones (las cuatro dimensiones del espacio-tiempo al que estamos acostumbrados, más 7 dimensiones ocultas). Esto genera escepticismo entre algunos teóricos, ya que al no haber evidencia, no queda claro, por ejemplo, si estas dimensiones adicionales existen realmente o son abstracciones matemáticas que la teoría requiere, pero que no tienen una base en la realidad.<sup>77</sup>

Ahora, la propuesta de Penrose es que el criterio objetivo que provoca RO es un rasgo intrínseco del espacio-tiempo, a saber, la gravedad cuántica. La propuesta de Penrose al respecto es bastante compleja,<sup>78</sup> pero sus principios básicos se pueden entender de forma relativamente sencilla.

Penrose comienza retomando la relatividad general de Einstein y en particular la noción de que la masa es equivalente a la curvatura del espacio-tiempo. Con esto en mano, Penrose considera ahora que una superposición cuántica —o separación real (desplazamiento) de la masa ‘de sí misma’— es equivalente a curvaturas espaciotemporales simultáneas en direcciones opuestas, generando burbujas [*bubbles*] o separaciones en la geometría espaciotemporal.

Para tener una idea más clara de esta propuesta, Hameroff y Penrose<sup>79</sup> representan la descripción tetra-dimensional del espacio-tiempo (i.e., las 3 dimensiones del espacio y la única dimensión del tiempo) como una ‘hoja de espacio-tiempo’ bidimensional, con una dimensión de espacio y la dimensión del tiempo (Figura 1). Si la masa es equivalente a la curvatura del espacio-tiempo, entonces la masa en un lugar puede ser representada por la curvatura fuera del gráfico (i.e., hacia el observador) y la masa en una segunda ubicación como una curvatura en el gráfico (i.e., alejada del observador).

---

<sup>76</sup> Duff 2003; véase también Weinberg 2003.

<sup>77</sup> Véase Arkani-Hamed, Dimopoulos y Dvali 2002.

<sup>78</sup> Los detalles matemáticos de la propuesta de gravedad cuántica se pueden ver en Penrose 1989, cap. 8, Penrose 1994 §6.10-6.12 y Penrose 1998b; ; más recientemente en Penrose 2001 y 2004, cap. 32.

<sup>79</sup> Hameroff y Penrose 1996a, 1997 y 2003.

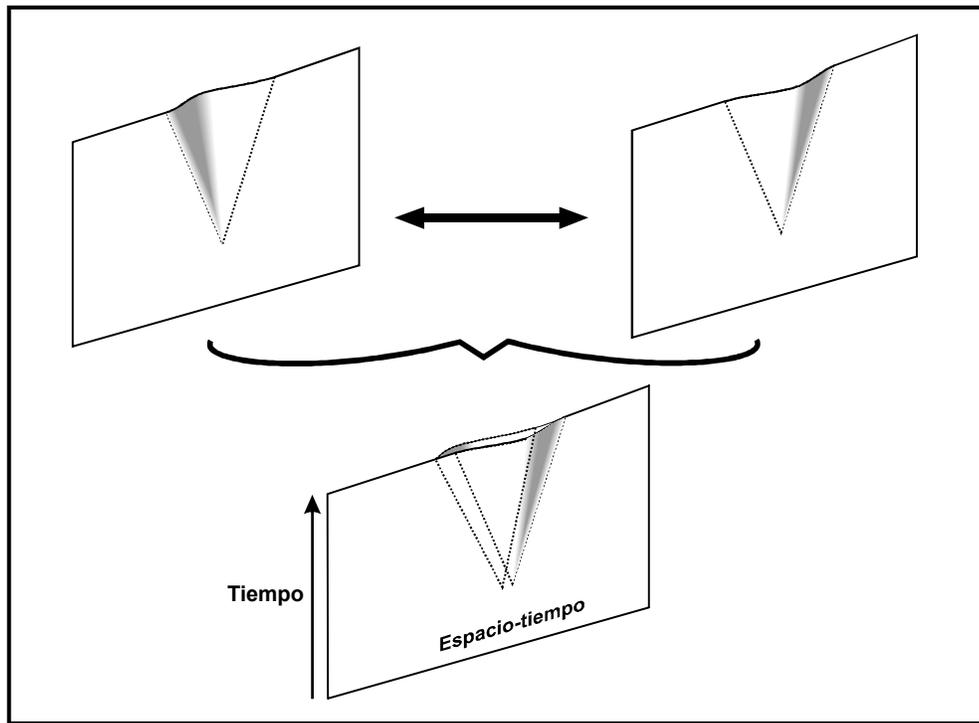


FIGURA 1. Representación esquemática de la superposición cuántica coherente como una separación del espacio-tiempo. Los dos diagramas superiores ilustran el espacio-tiempo bifurcándose y en el cual existen dos distribuciones de masa alternativas en la superposición cuántica. En el diagrama inferior, el espacio-tiempo en bifurcación se representa como la unión de las dos alternativas del espacio-tiempo de la parte superior (modificado de Hameroff y Penrose 1996a).

Estas dos curvaturas del espacio-tiempo (parte superior de la Figura 1) representan entonces la masa en dos lugares (o conformaciones) diferentes respectivamente. Así, la masa en superposición cuántica es una curvatura simultánea del espacio-tiempo en direcciones opuestas (parte inferior de la Figura 1), es decir, una separación o burbuja en el espacio-tiempo. Según Penrose, la superposición cuántica es una muy leve separación o burbuja (también la llama ampolla [*blister*]) en la geometría del espacio-tiempo.

Para Penrose, estas burbujas son inestables y tienen un grado objetivo crítico de separación que resulta en la reducción instantánea en estados clásicos inseparables. Las reducciones objetivas son por lo tanto, sucesos que reconfiguran la geometría espaciotemporal fundamental.

De acuerdo con Penrose, el umbral crítico de separación (o descoherencia) para que ocurra la reducción objetiva de una de estas burbujas en un estado específico, está dado por el principio de indeterminación

$$E = \hbar/T$$

donde  $E$  es la energía gravitacional de la masa en superposición (desplazada de sí misma, digamos, por el diámetro de su núcleo atómico),  $\hbar = h/2\pi$  y  $T$  es el tiempo de coherencia (i.e., el tiempo para el cual la superposición debe ser mantenida para inducir el autocolapso o reducción objetiva). Por lo tanto, el tamaño de un sistema aislado en superposición cuántica es inversamente proporcional a la longitud del tiempo hasta el autocolapso o RO.

Según Penrose,  $E$  se puede determinar por la cantidad de masa en superposición y la distancia de separación de la masa de sí misma. Entonces, de acuerdo con esto, los sistemas físicos grandes en superposición aislada se colapsarán muy rápidamente, mientras que los sistemas físicos pequeños persistirán en superposición cuántica por mucho más tiempo (e.g., el gato de Schrödinger cuya masa es de  $\approx 1$  kg, colapsará en un tiempo de  $10^{-37}$  seg., en tanto que un protón tardará  $10^7$  años en colapsarse). Penrose y Hameroff sugieren entonces que si en el cerebro ocurren también procesos RO, entonces el tiempo  $T$  para que ocurran eventos conscientes podría encontrarse en el rango de los 10 a los 500 milisegundos (e.g., 25 ms para las oscilaciones coherentes de 40 Hz, 100 ms para los ritmos electroencefalográficos Alfa y 500 ms para el potencial preparatorio previo a la ejecución de un acto voluntario). Más adelante regresaré con este último punto clave en el modelo de Penrose y Hameroff.

## 2.4. COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Otro elemento importante para el modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff es el de la computación cuántica.

La superposición cuántica y la subsiguiente reducción del vector de estado en estados clásicos, podría tener consecuencias tecnológicas importantes. Una de estas consecuencias fue prevista en la década de 1980 por algunos físicos como Paul Benioff, David Deutsch y Richard Feynman,<sup>80</sup> quienes propusieron que los estados en un sistema cuántico podrían interactuar (vía el entrelazamiento) y generar cómputos mientras se mantienen en superposición de todos los posibles estados del sistema.

---

<sup>80</sup> Benioff 1982; Deutsch 1985; Feynman 1986.

En el modelo clásico computacional,<sup>81</sup> el bit es la unidad básica de información y puede tener dos valores fundamentales que se denotan con 0 y 1. Un bit contiene el mínimo de información, por eso, para representar cantidades mayores de información se utilizan conjuntos de  $n$  bits llamadas cadenas de bits y se trabaja mediante el conocido sistema numérico binario:

0 — 0  
 1 — 1  
 2 — 10  
 3 — 11  
 4 — 100  
 5 — 101  
 6 — 110  
 7 — 111  
 8 — 1000  
 9 — 1001  
 10 — 1010  
 11 — 1011  
 12 — 1100, etcétera.

En este sistema, el dígito final a la derecha se refiere a las unidades, como en la notación decimal estándar, pero el dígito inmediatamente anterior se refiere a los 2 y no a las decenas; el dígito anterior se refiere a los 4 en lugar de centenas y el anterior a éste se refiere a los 8 en lugar de milésimos, y así sucesivamente, siendo el valor de cada dígito sucesivo, a medida que nos movemos hacia la izquierda, las potencias de dos, sucesivas (e.g., 1, 2 y  $4 = 2^2$ ,  $8 = 2^3$ ,  $16 = 2^4$ ,  $32 = 2^5$ , etcétera).

La computación cuántica comienza generalizando la unidad básica de información clásica, el bit, convirtiéndolo en qubit o bit cuántico, la unidad básica de información en computación cuántica. Así como un bit clásico se describe por su estado, que se representa con 1 ó 0, un qubit se describe por su estado cuántico, siendo sus dos estados básicos  $|1\rangle$  y  $|0\rangle$ .

Un bit clásico puede ser instanciado en diversos sistemas físicos, por ejemplo regiones magnéticas en discos, voltajes en circuitos de silicio o marcas de grafito hechas por un lápiz en una hoja de papel. De igual modo, un qubit puede ser instanciado físicamente por un sistema cuántico en dos estados, por ejemplo, partículas subatómicas de espín  $\frac{1}{2}$ .

---

<sup>81</sup> Véase e.g., Pylyshyn 1989.

Hasta aquí la computación cuántica no se diferencia en lo fundamental del modelo clásico: un bit tiene dos valores posibles y un qubit puede estar en dos estados cuánticos posibles. La diferencia radica en que un qubit puede estar, además, en estados intermedios, es decir, en estados en superposición cuántica.

En la computación cuántica, los datos pueden ser ingresados y puestos en superposición lineal, lo cual transforma cierto número de bits de ingreso en un gran número arbitrario de bits cuánticos superpuestos sobre los cuales se llevan a cabo cómputos de manera simultánea. Por ejemplo, siguiendo a Satinover,<sup>82</sup> supongamos que tenemos cuatro bits de ingreso, digamos 1001. Conforme estos bits clásicos ingresan en cierto dispositivo en una computadora cuántica, son convertidos en una superposición de todas las posibles combinaciones de números binarios de cuatro dígitos, a saber: 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110 y 1111 —esto porque cada bit 1 ó 0 ha sido convertido en un qubit—.

Ahora, ¿dónde se encuentran almacenados estos 16 números diferentes durante la fase de procesamiento de información? En una computadora convencional se requieren 16 diferentes direcciones —que representan 16 ubicaciones físicas diferentes— para almacenarlos. En una computadora cuántica, sin embargo, los 16 números son almacenados en un solo lugar, debido a que ahora se encuentran en una superposición lineal. Esto hace que la computación cuántica tenga muchas ventajas sobre la computación clásica.<sup>83</sup> Un ejemplo, propuesto por Michael Nielsen,<sup>84</sup> será suficiente para ver el enorme potencial de la computación cuántica: ¿cuántos pasos computacionales se necesitarían para encontrar los factores primos de un número de 300 dígitos? Al algoritmo clásico más poderoso que pudiera existir actualmente le tomaría aproximadamente  $5 \times 10^{24}$  pasos que, expresado en otros términos sería algo así como 150,000 años operando con velocidades de procesamiento de información en terahertzios (i.e., un billón de hertzios). En una computadora cuántica, no obstante y tomando la ventaja que ofrecen los estados cuánticos superposicionados, a un algoritmo cuántico sólo le tomaría  $5 \times 10^{10}$  pasos, es decir, menos de un segundo, también con velocidades de procesamiento de información en terahertzios.

---

<sup>82</sup> Satinover 2001, pp. 146, 147.

<sup>83</sup> Véase Deutsch y Jozsa 1992.

<sup>84</sup> Nielsen 2002, p. 51 y Nielsen 2003, p. 27.

Ahora bien, el principal obstáculo para la creación de computadoras cuánticas es la descoherencia, ya que los cálculos cuánticos deben tener lugar y mantenerse de modo aislado con respecto al ambiente exterior, evitando así que el contacto con éste provoque la reducción del vector de estado y por lo tanto que los sistemas cuánticos computacionales dejen de estar en coherencia cuántica.<sup>85</sup> Esta contaminación alteraría la fase crítica de procesamiento de información cuántica y la eventual reconstitución y reconfiguración de los qubits al final de algún cálculo. Hasta ahora no se ha podido construir un dispositivo físico concreto que pueda mantener la coherencia cuántica de los qubits, pero los teóricos esperan que un futuro no muy lejano, las computadoras cuánticas sean ya una realidad.<sup>86</sup>

## **2.5. COHERENCIA Y COMPUTACIÓN CUÁNTICAS EN LOS MICROTÚBULOS**

### **2.5.1. Coherencia y computación cuánticas en el cerebro**

Si la física cuántica juega un papel relevante en la actividad del cerebro y en consecuencia en el surgimiento de la conciencia, entonces la física cuántica debería ser no computable, ya que la conciencia, según todo el aparato argumentativo de Penrose, es no computable. Según el modelo de Penrose y Hameroff, esta versión no computable de la física cuántica es el esquema RO vía gravedad cuántica desarrollado por Penrose. ¿Por qué este esquema RO es no computable? Regresando a la cuestión sobre la reducción del vector de estado, podríamos tomar inicialmente una versión objetiva del proceso de colapso o reducción en términos de un proceso estocástico (i.e., un proceso aleatorio que puede ser analizado estadísticamente, pero que no se puede predecir con exactitud). Ciertamente, un proceso así tendría elementos indeterministas, pero los procesos estocásticos pueden ser implementados en una computadora convencional, y por consiguiente son computables. Penrose bosqueja algunas ideas concernientes a los rasgos genuinamente no computables —y no sólo aleatorios— de la

---

<sup>85</sup> El término coherencia se refiere al hecho general de que las oscilaciones en lugares diferentes varían al unísono. En física cuántica, la coherencia hace referencia a la naturaleza oscilatoria de la función de onda. Este fenómeno ocurre en circunstancias en las cuales grandes números de partículas pueden cooperar colectivamente en un simple estado cuántico que permanece esencialmente no entrelazado con su entorno. La descoherencia cuántica ocurre cuando un sistema entrelazado interactúa con el entorno, convirtiéndose en un sistema abierto. La descoherencia es un proceso extremadamente rápido para los sistemas macroscópicos, ya que éstos interactúan con muchos sistemas microscópicos en su entorno natural. Este proceso puede explicar por qué no observamos el comportamiento cuántico a nivel clásico y está relacionado con el llamado colapso de la función de onda.

<sup>86</sup> DiVincenzo 1995; Grupo de Computación Cuántica 2003; Phillips 2001.

gravidad cuántica en *Shadows*. Sus ideas al respecto resultan algo complejas y no es necesario que las revisemos en detalle.<sup>87</sup> Nos podemos quedar sólo con la conclusión general de que la RO inducida gravitacionalmente es un proceso no computable.

Ahora, si los procesos cuánticos (no computables) están operando en el cerebro, la cuestión es cómo operan y dónde lo hacen. En primer lugar, resulta obvio que si el cerebro es un sistema físico, su estructura y funcionamiento deben estar gobernados por las leyes de la física cuántica, como cualquier otro sistema físico. El problema es que en las diversas actividades que ocurren en el cerebro y sus sistemas, las superposiciones cuánticas —y por lo tanto los efectos de interferencia característicos de tales fenómenos cuánticos—, no parecen tener relevancia para ellas, ya que los fenómenos de descoherencia cuántica hacen que la actividad del cerebro esté de acuerdo con las leyes de la física clásica. Lo que Penrose y Hameroff requieren entonces, es encontrar un lugar en el cerebro donde se pueda mantener la coherencia cuántica. ¿Qué requisitos debe reunir este sitio, cuál es este sitio y cómo opera para mantener la coherencia cuántica?

Según Penrose y Hameroff,<sup>88</sup> la estructura biológica cerebral para los efectos cuánticos y que resulte relevante para la conciencia debe reunir los siguientes requisitos:

- ubicuidad alta dentro del cerebro;
- importancia funcional (e.g., regulación de la conectividad neuronal y de la función sináptica);
- una estructura periódica tipo cristal con un elevado orden (e.g., una *lattice* bipolar);
- alto grado de coherencia cuántica (durante un período lo suficientemente largo para alcanzar el umbral crítico para la RO vía gravidad cuántica, pero lo suficientemente breve para los eventos conscientes: por ejemplo 25 ms para las oscilaciones coherentes de 40 Hz y 500 ms para el potencial preparatorio previo a la ejecución de un acto voluntario);
- capacidad para acoplarse funcionalmente a procesos RO para aislarse transitoriamente del ruido ambiental hasta que tenga lugar la RO (este aislamiento se requiere para que la reducción no sea sólo aleatoria; el movimiento de la masa en el ambiente con el que

---

<sup>87</sup> Penrose mismo admite que estas ideas están “lejos de ser concluyentes” (Penrose 1996, §12.2.).

<sup>88</sup> Hameroff y Penrose 1995, 1996a, 1996b, 1997 y 2003.

se entrelaza el estado cuántico efectuaría una reducción aleatoria y por lo tanto no computable);

- debe funcionar como autómata celular con capacidad de procesamiento de información cuántica operando con qubits;
- debe dar lugar a cascadas de ROs para que haya una corriente [stream] de eventos conscientes; un gran número de sucesos RO debería tener lugar durante el curso de la vida de un organismo.

¿Qué estructura biológica en el cerebro es capaz de reunir estos requisitos? Penrose y Hameroff se encuentran primero con un obstáculo. Volvamos al fenómeno de coherencia cuántica. Recordemos que la coherencia cuántica es una circunstancia en la cual un número considerable de partículas pueden cooperar colectivamente en un mismo estado cuántico que permanece esencialmente no entrelazado con su entorno. Semejantes estados se observan en los fenómenos de superconductividad y superfluidez —conocidos también como condensación Bose-Einstein—. En los superconductores las corrientes eléctricas pueden fluir sin ninguna resistencia eléctrica por que ésta cae a cero. En los superfluidos, la fricción del fluido o viscosidad cae a cero y permite que el superfluido fluya sin ninguna resistencia.<sup>89</sup> El elemento característico de los fenómenos de coherencia es la existencia de una brecha de energía que tiene que ser superada por el ambiente para que éste perturbe este estado cuántico. Si la temperatura del ambiente es demasiado elevada, de modo que la energía de muchas partículas del mismo sea lo suficientemente grande para que superen esta brecha y se entrelacen con el estado, entonces la coherencia cuántica es destruida. Por ello, los fenómenos de superconductividad y superfluidez en la naturaleza sólo ocurren a bajas temperaturas, sólo unos grados por arriba del cero absoluto.<sup>90</sup>

El obstáculo consiste en que el cerebro —de hecho cualquier otro sistema biológico— es un objeto físico caliente y por ello, *prima facie*, en éste no se pueden dar efectos de coherencia cuántica. Sin embargo, a finales de los años 1960, el físico Herbert Fröhlich, quien desde la década de 1930 contribuyó a los avances en la comprensión de la superconductividad general a bajas temperaturas, sugirió —basado en las investigaciones de Lars Onsager y del hermano de Roger Penrose, Oliver Penrose—<sup>91</sup> que en los sistemas biológicos sí podrían darse los

<sup>89</sup> Marshall, Zohar y Peat 1997, pp. 333-335.

<sup>90</sup> 0° K ó -273.15° C, la temperatura más baja teóricamente posible

<sup>91</sup> Penrose y Onsager 1956.

fenómenos de coherencia cuántica. De manera específica, Fröhlich propuso que en conjuntos de dipolos de proteínas en un campo electromagnético común (e.g., proteínas dentro de una membrana polarizada o subunidades dentro de un polímero, como en los MTs) hay efectos vibratorios y que estos conjuntos resonarían con la radiación electromagnética de microondas, a  $10^{11}$  Hz, como resultado de un fenómeno de coherencia cuántica biológica. Así, en lugar de requerir una temperatura baja, los efectos de coherencia cuántica en estos sistemas biológicos aparecen a partir de la existencia de una gran energía de impulso metabólico en las reacciones enzimáticas. Fröhlich postuló que la energía bioquímica y térmica del baño caliente del entorno citoplásmico, proporciona este impulso energético. Mientras este impulso sea lo suficientemente grande y las propiedades dieléctricas de los sistemas biológicos sean lo bastante extremas, entonces existe la posibilidad de coherencia cuántica a gran escala similar a la de los condensados Bose-Einstein, incluso a temperaturas relativamente altas, presentes en los sistemas biológicos.<sup>92</sup> Evidencia posterior demostró que en las células se dan en efecto estas oscilaciones de  $10^{11}$  Hz como lo había predicho Fröhlich.<sup>93</sup>

La idea original de Fröhlich era que la coherencia cuántica podría ocurrir probablemente en las membranas de las células. Otros candidatos podrían ser las proteínas de las membranas celulares, las sinapsis, la mielina y los iones de calcio. Sin embargo, Penrose y Hameroff sugieren que las estructuras más plausibles para que ocurran la coherencia cuántica son los microtúbulos, que además reúnen los requisitos necesarios para jugar un papel relevante en el surgimiento de la conciencia.

### **2.5.2. Los microtúbulos citoesqueléticos**

Las células —y entre ellas las neuronas— deben organizarse en un espacio e interactuar mecánicamente con su entorno. Además, deben tener una forma adecuada, ser físicamente resistentes y estar estructuradas en su interior de un modo apropiado. Muchas de ellas deben también ser capaces de modificar su forma y cambiarse de un lugar a otro, y todas ellas tienen que ser capaces de reorganizar su componentes internos conforme crecen, se dividen y se adaptan a las cambiantes circunstancias del medio externo. Todas estas funciones espaciales y

---

<sup>92</sup> Fröhlich 1975.

<sup>93</sup> Grundler y Keilmann 1983.

mecánicas son desarrolladas por medio de una compleja red de filamentos proteicos llamada citoesqueleto.<sup>94</sup>

El citoesqueleto es el principal determinante intrínseco de la forma de las neuronas y es responsable de la distribución asimétrica de los organelos dentro del citoplasma. Las diversas actividades del citoesqueleto dependen de tres tipos de filamentos proteicos: (i) los neurofilamentos (llamados filamentos intermedios en las células no nerviosas), (ii) los microfilamentos (también llamados filamentos de actina) y (iii) los microtúbulos.

Los microtúbulos (a partir de aquí MTs) son estructuras cilíndricas huecas y rígidas formadas por subunidades de proteínas llamadas tubulinas. Estas subunidades proteicas son en sí mismas heterodímeros<sup>95</sup> de 8 nm formados por dos proteínas globulares fuertemente unidas llamadas  $\alpha$ -tubulina y  $\beta$ -tubulina de 4 nm.<sup>96</sup> El diámetro externo de los MTs es de 25 nm, su diámetro interno es de 15 nm y sus longitudes son muy variadas, llegando a ser tan largos como los axones, y son mucho más rígidos que los microfilamentos. Además de mantener la arquitectura estructural del citoplasma, los MTs llevan a cabo una variedad de funciones de importancia vital para las células, entre las que se incluyen: (i) el transporte intracelular de organelos vía proteínas motoras; (ii) la movilidad celular vía movimiento de cilios y flagelos; (iii) la orquestación de la división cromosómica durante la mitosis; (iv) la transducción de señales dentro axones; y (v) un papel en la comunicación entre el exterior de la célula y el núcleo.<sup>97</sup>

---

<sup>94</sup> Alberts *et al.* 2002, cap. 16., Egile, Lechler y Li 2001; Pollard 2003.

<sup>95</sup> Los heterodímeros son complejos proteicos formados por dos cadenas polipeptidas diferentes.

<sup>96</sup> Existe otra subunidad proteica llamada  $\gamma$ -tubulina y que es muy poco común. Durante las etapas llamadas interfase y metafase de la mitosis (división del núcleo de las células eucariotas con la condensación del ADN en cromosomas visibles) se distingue una región del citoplasma llamada material pericentriolar o matriz del centrosoma (también se le conoce como citomatriz) y es la región del centrosoma que nuclea la polimerización de los microtúbulos. Esta matriz del centrosoma está compuesta por  $\gamma$ -tubulina, la cual interactúa con el dímero  $\alpha/\beta$ -tubulina colaborando en la nucleación de los microtúbulos (al respecto véase Scholey, Rogers y Sharp 2001).

<sup>97</sup> Brown y Tuszyński 1997; Carminati y Stearns 1997; Maniotis, Chen e Ingber 1997; Satinover 2001, pp. 165-167; Tuszyński *et al.* 1996; Tuszyński, Brown y Hawrylak 1998.

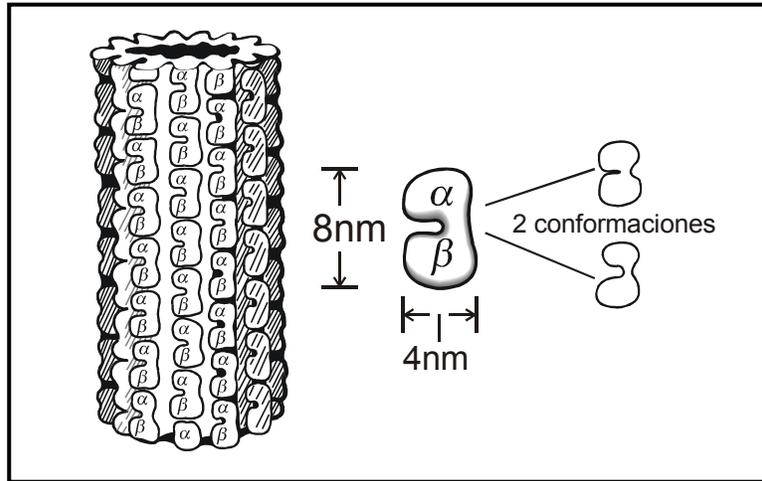


FIGURA 2. Estructura de un microtúbulo (tomado de Hameroff y Penrose 1996b)

Un MT (Figura 2) está construido por 13 protofilamentos lineales, cada uno de los cuales está formado por subunidades alternadas de monómeros de  $\alpha$ -tubulina y  $\beta$ -tubulina, dispuestos paralelamente formando la estructura cilíndrica del MT. Dado que los 13 protofilamentos están alineados en paralelo con la misma polaridad, se dice que los MTs son estructuras polares, y es posible distinguir un extremo más [*plus end*], de crecimiento rápido y un extremo menos [*minus end*], de crecimiento lento.<sup>98</sup> Cuando los heterodímeros de tubulina se ensamblan para formar los MTs cilíndricos huecos, generan dos nuevos tipos de contactos proteína-proteína. A lo largo del eje longitudinal del MT, la cima de un monómero  $\beta$ -tubulina forma una interfase con la base de un monómero  $\alpha$ -tubulina en la subunidad de dímero adyacente. Esta interfase es muy similar a la interfase que mantiene unido al dímero  $\alpha/\beta$ -tubulina y la energía de enlace es muy fuerte. Perpendicular a estas interacciones, se forman contactos laterales entre los protofilamentos contiguos. En esta dimensión, los principales contactos laterales se dan entre monómeros del mismo tipo (i.e.,  $\alpha$ - $\alpha$  y  $\beta$ - $\beta$ ). Juntos, los contactos longitudinales y laterales se repiten de forma regular en la *lattice* helicoidal del MT. Debido a que la mayoría de las subunidades de monómeros en un MT se mantienen en su sitio mediante múltiples contactos dentro de la *lattice*, la adición o pérdida de subunidades ocurre casi de forma exclusiva en las terminales del MT.

En las células nerviosas, al igual que en muchas células del organismo, hay un continuo recambio de la red microtubular. La vida media de un MT individual es de aproximadamente

<sup>98</sup> Alberts *et al.* 2002.

10 minutos, mientras que la vida media de una molécula de tubulina, desde su síntesis hasta su degradación, puede llegar a ser hasta de 20 horas. Así pues, cada molécula de tubulina participa en la formación y desmantelamiento de muchos MTs durante su período de vida. Este continuo proceso de polimerización y despolimerización<sup>99</sup> se llama inestabilidad dinámica y juega un papel muy importante en el posicionamiento de los MTs en la célula. La inestabilidad dinámica de los MTs necesita un aporte energético para equilibrar el balance químico entre la polimerización y la despolimerización. Este aporte de energía proviene de la hidrólisis de la molécula GTP.<sup>100</sup> Cada monómero  $\alpha$  ó  $\beta$  tienen un sitio de enlace para una molécula GTP (se dice entonces que son las subunidades  $\alpha$  y  $\beta$  son moléculas GTPasa). La GTP se une a la subunidad  $\beta$ -tubulina del dímero  $\alpha/\beta$ -tubulina<sup>101</sup> y, cuando la molécula de tubulina se incorpora al extremo de un MT, esta molécula de GTP es hidrolizada en GDP.<sup>102</sup> La inestabilidad dinámica opera del siguiente modo:<sup>103</sup> la adición de los heterodímeros de  $\beta$ -tubulina que transportan GTP a un extremo del protofilamento provoca su crecimiento en una conformación lineal, lo cual favorece el empaquetamiento en la pared cilíndrica del MT, es decir, lo convierte en estabilizado. La hidrólisis de la GTP después del ensamblaje modifica la conformación de las subunidades y el protofilamento tiende a deformarse en una forma curvada que es menos capaz de empaquetarse en la pared del MT.

En un MT intacto, los protofilamentos formados por subunidades que contienen GDP son forzados a adoptar una conformación lineal mediante los muchos enlaces laterales de la pared del MT, especialmente en el casquete estable de subunidades que contienen GTP. La pérdida del casquete de GTP permite que los protofilamentos que contienen GDP se relajen y adopten

---

<sup>99</sup> La polimerización es el proceso mediante el cual los tres principales tipos de proteínas citoesqueléticas (polímeros de polipéptidos, actina, tubulina) se ensamblan para formar los tres tipos de filamentos citoesqueléticos (neurofilamentos, microfilamentos y microtúbulos, respectivamente). La *despolimerización* es el proceso inverso.

<sup>100</sup> La molécula GTP (guanosina 5'-trifosfato), es el principal nucleósido trifosfato —un nucleósido es un compuesto orgánico formado por una base de purina o pirimidina, las cuales son las dos categorías de compuestos con anillos de nitrógeno que se encuentran en el ADN y el ARN, e.g., la adenina y la guanina— utilizado en la síntesis de ARN y en algunas reacciones de transferencia de energía. Además de jugar un papel especial en el ensamblaje de los microtúbulos, la GTP también interviene en la síntesis de proteínas y en la señalización celular.

<sup>101</sup> La subunidad  $\alpha$ -tubulina también transporta GTP, pero no puede ser intercambiado por GTP libre y no es hidrolizado, por lo cual puede considerarse como una parte fija de la estructura proteica de la tubulina.

<sup>102</sup> La molécula GDP (guanosina 5'-difosfato) es un nucleótido, i.e., un nucleósido con uno o más grupos de fosfato unidos al azúcar mediante enlaces éter. Al ADN y el ARN con polímeros de nucleótidos.

<sup>103</sup> Véase Desai y Mitchison 1997; Howard y Hyman 2003; Nogales 2000 y 2001.

su conformación curvada. Esto conduce a una disrupción progresiva del MT y el desensamblaje final de los protofilamentos, formando dímeros de tubulina libres.

Las subunidades de tubulina de los MTs que han sido selectivamente estabilizadas pueden ser modificadas covalentemente. Dos modificaciones fundamentales son: (1) la acetilación de la  $\alpha$ -tubulina en un residuo determinado de lisina y (2) la destirosinación o eliminación de un residuo de tirosina del extremo carboxilo terminal de la  $\alpha$ -tubulina. La acetilación y la destirosinación son reacciones enzimáticas lentas que tienen lugar sólo en los MTs y no se producen sobre moléculas de tubulina libres. Estas reacciones pueden ser detectadas mediante anticuerpos específicos y proporcionan un indicio de la estabilidad de los MTs en aquellas células en las cuales es difícil estudiar directamente la dinámica de los MTs.

Ahora, aunque la acetilación y la destirosinación marcan a ciertos MTs como maduros y pueden aumentar su estabilidad, las modificaciones más extendidas y versátiles de los MTs —y en consecuencia las propiedades estables y mecánicas de todo el citoesqueleto— son las conferidas por un conjunto de proteínas que se enlazan a las subunidades de tubulina. En los MTs, estas proteínas se denominan proteínas asociadas a los microtúbulos ó MAP (de *microtubule-associated proteins*) y actúan estabilizando los MTs contra el desensamblaje. Dada la diversidad de funciones de los MTs, hay muchos tipos de MAPs; algunas de ellas están ampliamente distribuidas en la mayoría de las células, mientras que otras se encuentran tan sólo en algunos tipos específicos de células. Un tipo de MAPs actúa mediando la interacción de los MTs con otros componentes celulares. Este subconjunto es prominente en las neuronas, donde haces de MTs estabilizados forman los núcleos de los axones y las dendritas que se extienden desde el soma de las células nerviosas.

Los dos principales tipos de MAPs son: (1) las proteínas HMW [*high molecular weight*], que tienen pesos moleculares de 200,000 a 300,000 daltons o más, y (2) las proteínas tau, de pesos moleculares entre 55,000 y 62,000 daltons. Ambos tipos de proteínas tienen dos dominios y sólo uno de ellos se une a los MTs; se cree que el otro dominio permite a los MTs unirse a otros componentes celulares.<sup>104</sup>

Muchos tipos celulares estabilizan específicamente los MTs en regiones especializadas del citoplasma. Quizá el ejemplo más estudiado es el de las neuronas. En ellas, los axones y las dendritas están formados por MTs, aunque con disposiciones distintas. En los axones, los MTs son muy largos y todos están orientados en su extremo ‘más’ alejado del soma. En las

---

<sup>104</sup> Hayashi e Ikura 2003.

dendritas, los MTs son más cortos y su polaridad es mixta; algunos de los extremos ‘más’ se alejan del cuerpo celular, mientras que otros dirigen su extremo ‘más’ hacia este soma. En los estudios de la distribución de las MAPs en neuronas cultivadas mediante anticuerpos específicos, se observa cómo ciertas formas de la proteína tau se encuentran solamente en los axones;<sup>105</sup> por otro lado, un tipo de MAP (las MAP 2) sólo se encuentra en las dendritas y en el soma, y está totalmente ausente en los axones.<sup>106</sup>

### 2.5.3. Coherencia y computación cuánticas en los microtúbulos

¿Por qué los MTs son las estructuras cerebrales más adecuadas para mantener la coherencia cuántica, según Penrose y Hameroff? La elección de Penrose y Hameroff de los MTs obedece primero a la estructura tubular que estos tienen. Al respecto dice Penrose: “Being tubes, there is a plausible possibility that they might be able to isolate what is going on in their interiors from the random activity in the environment”.<sup>107</sup> Y en *Shadows* dice:

It is indeed tempting to believe that Nature has chosen hollow tubes in her cytoskeletal structures for some good purpose. Perhaps the tubes themselves serve to provide the effective insulation that would enable the quantum state in the interior of the tube to remain unentangled with its environment for an appreciable time.<sup>108</sup>

Penrose y Hameroff tienen algunas sugerencias sobre cómo los MTs pueden mantener la coherencia cuántica. Una de estas sugerencias tiene que ver con el agua, la sustancia más abundante de las células y que constituye aproximadamente el 70% del peso celular. La mayoría de las actividades de las células se llevan a cabo en este medio acuoso. El agua, *prima facie*, no es una sustancia lo suficientemente organizada —dado el movimiento aleatorio de sus moléculas— para mantener la coherencia cuántica en alguna estructura celular, sin embargo, el agua que se encuentra en las células tienen una estructura molecular organizada, por lo que el biólogo James Clegg le dio el nombre de agua vecinal [*vicinal water*].<sup>109</sup> De acuerdo con John

---

<sup>105</sup> Chen *et al.* 1992.

<sup>106</sup> Sánchez, Díaz-Nido y Avila 2000; Vallee 1980.

<sup>107</sup> Penrose 1997b, p. 131.

<sup>108</sup> Penrose 1994, p. 368.

<sup>109</sup> Clegg 1979, 1983.

Watterson,<sup>110</sup> la cualidad de unicidad [*oneness*] de las células, está íntimamente relacionada con el agua ordenada o vecinal en las superficies de proteínas celulares. El tamaño de éstas —aproximadamente 5 nm— puede ser la frontera entre el caos térmico —relacionado con la segunda ley de la termodinámica— y el orden en la materia viva. Según Watterson, grupos de agua vecinal de las proteínas en el rango de los 5 nm produce amplios patrones tridimensionales cooperativos que pueden resonar y transformarse en estados cuánticos macroscópicos. Si esta idea es correcta, entonces cabe la posibilidad de que en algunas estructuras celulares, como en el citoesqueleto neuronal, el agua vecinal ayude a mantener la coherencia cuántica.

Usando la teoría cuántica de campos, Hameroff y sus colegas<sup>111</sup> crearon un modelo computacional de la estructura ordenada del agua vecinal y del campo electromagnético dentro de los núcleos huecos de los microtúbulos. Este modelo computacional predice una dinámica colectiva específica a la que llaman súper-resplandecencia [*super-radiance*] en la cual cada microtúbulo puede transformar energía (molecular, térmica o electromagnética) incoherente y desordenada en fotones coherentes dentro de su núcleo hueco. El tiempo para la generación de un fotón súper-resplandeciente (o súper-radiante) es mucho menos que el tiempo necesario para que el entorno actúe térmicamente cortando la coherencia cuántica.

Otra sugerencia proviene de las transformaciones sol-gel y de los ciclos de polimerización de la actina. Al igual que los microfilamentos y los neurofilamentos, los MTs se encuentran incrustados en el citoplasma, el cual se mantiene en ciclos alternantes de sol (i.e., como solución) y gel (i.e., una fase entre sólida y gelatinosa). La transición entre los ciclos sol y gel depende de la polimerización de la actina. Las transformaciones sol-gel se encuentran entre las actividades celulares más primitivas, y en las neuronas, al igual que en otras células del organismo, son provocadas por el ensamblaje y desensamblaje de la actina citoesquelética (e.g., reguladas por iones de calcio por medio de la proteína calmodulina, que a su vez es regulada por los MTs). Las transformaciones sol-gel son esenciales para algunas actividades celulares como el movimiento, la formación y crecimiento sinápticos y la liberación de neurotransmisores. La actina se copolimeriza con diferentes tipos de proteínas de entrecruzamiento de actina [*actin cross-linking proteins*] para formar microfilamentos y varias clases de geles. Las características de los diferentes tipos de geles están determinadas por entrecruzadores particulares de actina. Estudios con resonancia magnética nuclear parecen

---

<sup>110</sup> Watterson 1996.

<sup>111</sup> Véase Jibu, Hagan y Yasue 1996; Jibu *et al.* 1994.

mostrar que la gelación de la actina enlaza y ordena el agua vecinal hasta en un 55%.<sup>112</sup> Las transformaciones sol-gel pueden ocurrir muy rápidamente (e.g., 40 ciclos sol-gel por segundo). De los diversos tipos de geles, algunos son viscoelásticos, mientras que otros (e.g., aquellos inducidos por el entrecruzados de actina llamado avidina) son muy sólidos y pueden ser deformados con la aplicación de alguna fuerza sin mostrar resistencia.<sup>113</sup>

Hameroff<sup>114</sup> sugiere que en los MTs rodeados por estos tipos sólidos de geles se pueden aislar los estados cuánticos de la descoherencia ambiental. Si esta idea es correcta, entonces, de acuerdo con Hameroff, se pueden considerar dos ciclos básicos de computación cuántica en los MTs (e.g., en los ciclos de gelación/solución de la actina en las dendritas): (a) fase de gelación (i.e., de estado sólido ‘gel’) y que correspondería al aislamiento ambiental requerido para mantener la coherencia cuántica y permitir cómputos cuánticos, y (b) fase de solución (i.e., de estado ‘sol’ líquido), que correspondería a la comunicación con el ambiente y por lo tanto a la descoherencia cuántica, lo que sería la fase de solución de cómputos cuánticos que finalmente resultan en computación clásica.

Anteriormente, Hameroff y sus colaboradores<sup>115</sup> ya habían sugerido que los MTs son capaces de procesamiento de información y que podrían operar como autómatas celulares. En los sistemas computacionales, el complejo comportamiento que resulta de la actividad colectiva de unidades simples ocurre en los llamados autómatas celulares, introducidos por Von Neumann. Los autómatas celulares son sistemas dinámicos discretos cuyo comportamiento está completamente especificado en términos de una relación local. En la práctica, los autómatas celulares son para los científicos computacionales el equivalente del concepto de campo para los físicos. Von Neumann y otros tomaron prestado el término célula en biología y propusieron que una célula es la unidad indivisible en un autómata celular. Las células de los autómatas celulares son subunidades discretas que tienen un número finito de estados. Los rasgos principales de los autómatas celulares son: (1) en cualquier momento, cada célula se encuentra en uno de un número determinado de estados; (2) las células están organizadas en una geometría fija; (3) cada célula se comunica sólo con otras células en su vecindad (el tamaño y forma de la vecindad puede ser de 4 (rectangular), 6 (hexagonal), 8 (rectangular con esquinas) o más vecinas por unidad o célula; (4) hay un reloj universal (cada

---

<sup>112</sup> Pauser *et al.* 1995.

<sup>113</sup> Alberts *et al.* 2002.

<sup>114</sup> Hameroff 1998c, p. 144 y 1998f, p. 1878.

<sup>115</sup> Véase Rasmussen *et al.* 1990.

célula puede cambiar a un nuevo estado a cada tictac del reloj, dependiendo de su estado presente y del de las células vecinas; las reglas para cambiar de estado se llaman reglas de transición y pueden dar lugar a complejos patrones dinámicos).

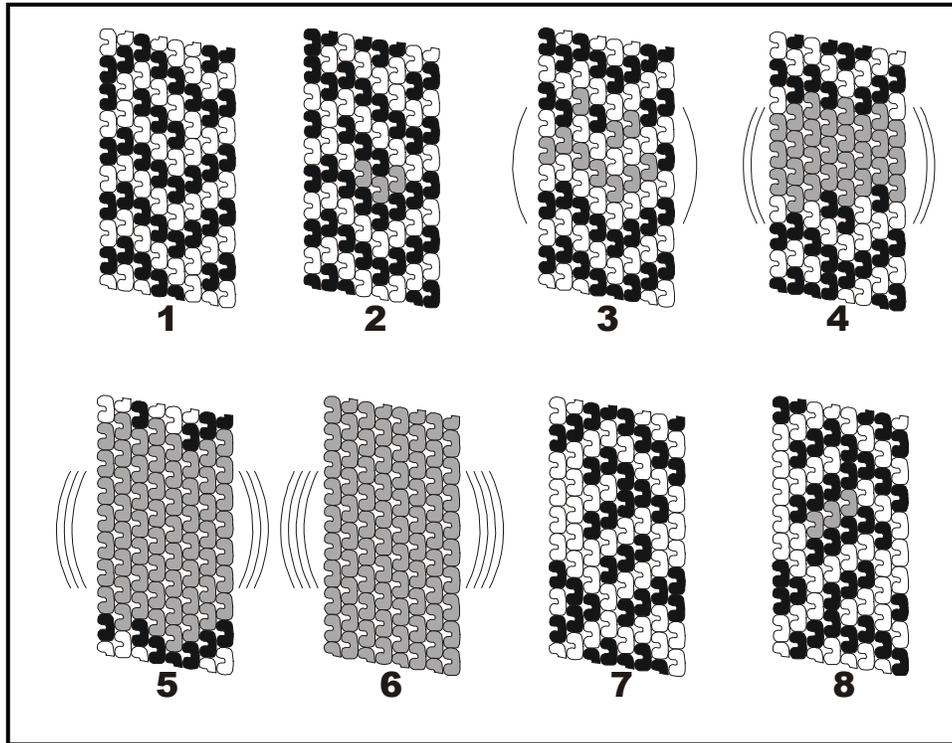


FIGURA 3. Simulación de una secuencia de microtúbulos como autómatas celulares (según Rasmussen *et al.*, 1990). Las tubulinas en blanco y negro corresponden a los estados mostrados en la Figura 4. Se muestran aquí las etapas de un microtúbulo en un tiempo de 8 nanosegundos. En esta secuencia, la computación clásica (etapa 1) conlleva al surgimiento de una superposición cuántica coherente (etapas 2-6) en ciertas tubulinas (mostradas en gris) debido a una resonancia del patrón. La etapa 6 (en coherencia con otras tubulinas microtubulares) alcanza un umbral crítico relacionado con la gravedad cuántica para el autocolapso (proceso RO Orch). Según Hameroff y Penrose, la conciencia (RO Orch) ocurre en la transición de la etapa 6 a la 7. La etapa 7 representa el eigenestado o estado cuántico de la distribución de la masa del colapso, la cual evoluciona por medio de autómatas computacionales clásicos para regular las funciones neuronales. La coherencia cuántica comienza a resurgir en la etapa 8 (tomado de Hameroff y Penrose 1996a y 1996b).

El modelo que Hameroff y sus colegas desarrollaron<sup>116</sup> utiliza excitaciones cuánticas coherentes de las subunidades de tubulina dentro de los MTs como lo propuso Fröhlich.<sup>117</sup> Estas excitaciones le confieren a los MTs la capacidad de procesamiento de la información. El modelo propone que las excitaciones coherentes funcionan como el reloj que sincroniza las transiciones que ocurren entre los monómeros de tubulina vecinos, los cuales actúan como las

<sup>116</sup> Rasmussen *et al.* 1990.

<sup>117</sup> Fröhlich 1975.

células, similar a como lo hacen las células en los autómatas celulares de escala molecular. Las conjugaciones polares en dipolos entre las tubulinas vecinas en la *lattice* de los MTs, funcionarían como las reglas de transición que median las interacciones entre las tubulinas y que resultan en patrones auto-organizativos capaces de procesar información y participar en los procesos de memoria y aprendizaje (Figura 3).

Ahora, si en los microtúbulos se pueden llevar a cabo cómputos cuánticos, entonces los qubits deberían ser instanciados de algún modo dentro de ellos. Penrose y Hameroff sugieren que el dímero  $\alpha/\beta$ -tubulina podría operar en superposición cuántica de los dos monómeros. Si esto es posible, entonces cada superposición dímero  $\alpha/\beta$ -tubulina sería un qubit de sus dos conformaciones básicas (bits):  $\alpha$ -tubulina y  $\beta$ -tubulina (Figura 4). Los cómputos cuánticos más complejos requerirían varias subunidades de tubulina en una superposición de todos sus posibles estados (Figura 5). La sugerencia de Penrose y Hameroff tiene que ver con las fuerzas de atracción entre las dos subunidades proteicas.

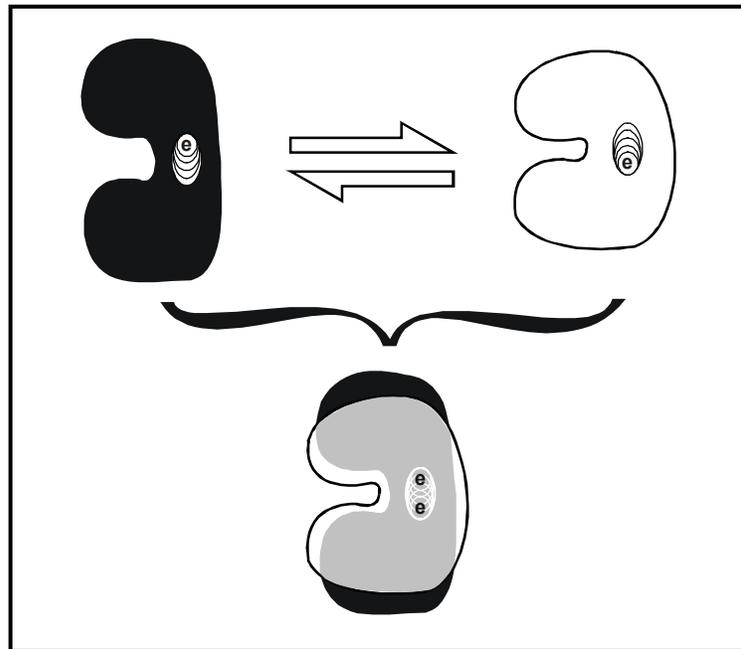


FIGURA 4. Diagrama esquematizado del cambio de una tubulina entre dos estados conformacionales gobernados por interacciones van der Waals en un bolsillo hidrofóbico. La parte superior representa el cambio de la tubulina entre dos conformaciones y la parte inferior la superposición de estos dos estados (tomado de Hameroff y Penrose 1996a, 1996b).

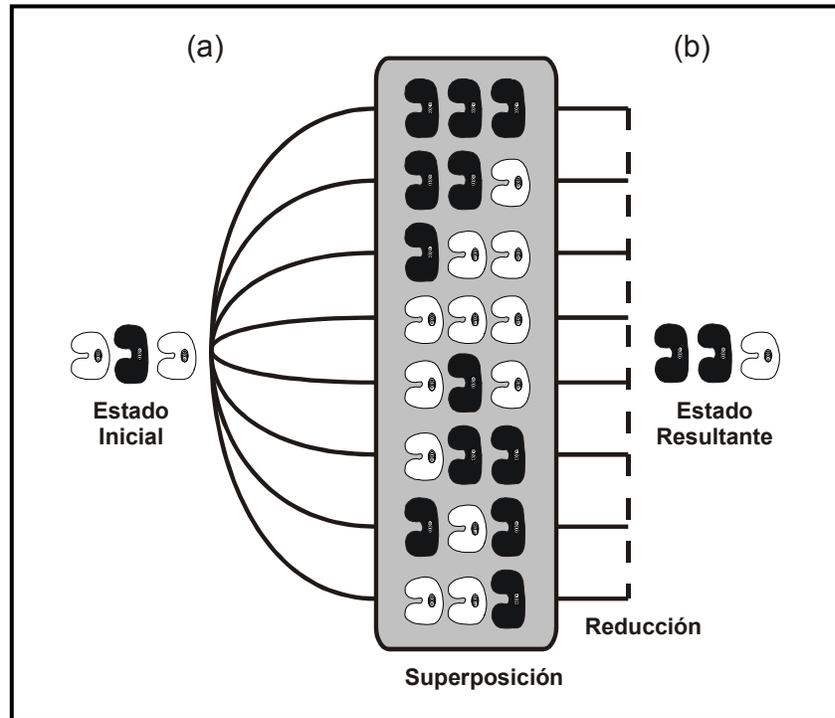


FIGURA 5. Diagrama esquemático de la computación cuántica de tres tubulinas que comienza en (a) estados clásicos iniciales y después entran en una superposición cuántica aislada en la cual coexisten todos los estados posibles. Tras la reducción, es elegido un resultado clásico particular (b). (Modificado de Hameroff 1998f)

Las proteínas son macromoléculas versátiles que llevan a cabo una variedad de funciones vitales en las células al cambiar su conformación (e.g., movimiento muscular, enlaces moleculares, metabolismo, movimiento y fase del citoplasma, etc.). Las proteínas individuales son sintetizadas como cadenas lineales de cientos de aminoácidos que se doblan o tuercen en una conformación tridimensional. La manera precisa como se conforman las proteínas depende de las fuerzas de atracción y repulsión<sup>118</sup> entre los diversos grupos de aminoácidos, y al parecer las proteínas pueden llegar a tener muchas conformaciones intermedias posibles antes de su conformación final.<sup>119</sup> Las principales fuerzas de interacción molecular en la conformación de proteínas actúan cuando los grupos de aminoácidos particulares no polares se conjuntan y evitan el agua. A estas fuerzas de atracción que conforma tales bolsillos hidrofóbicos<sup>120</sup> [*hydrophobic pockets*] se les conoce como fuerzas van der Waals London<sup>121</sup> y son

<sup>118</sup> e.g., interacciones de carga, como por ejemplo enlaces covalentes, iónicos, electrostáticos y de hidrógeno

<sup>119</sup> Alberts *et al.* 2002.

<sup>120</sup> El término 'hidrofóbico' (que literalmente significa 'que detesta el agua'), se refiere a moléculas no polares o a las partes no polares de una molécula que no forman interacciones favorables con el agua, por lo cual no se disuelven en ella.

<sup>121</sup> A veces sólo fuerzas van der Waals o fuerzas London; también fuerzas London de dispersión.

un tipo de interacción bipolar. Hay tres tipos de fuerzas van der Waals: (i) dipolo permanente-dipolo permanente, (ii) dipolo permanente-dipolo inducido, y (iii) dipolo inducido-dipolo inducido.

Las subunidades de tubulina  $\alpha$ -tubulina y  $\beta$ -tubulina que conforman los MTs también pueden tener una diversidad de conformaciones debido a las fuerzas de interacción molecular. Por ejemplo, se sabe que un monómero puede cambiar unos 30° del eje vertical del dímero.<sup>122</sup> Sin embargo, no existe evidencia directa de que en los MTs las conformaciones de las subunidades proteicas estén reguladas por efectos cuánticos. A pesar de ello, para Penrose y Hameroff esto es plausible ya que cierta evidencia sugiere que en las conformaciones de otras clases de proteínas sí están operando algunas acciones cuánticas. Herbert Fröhlich<sup>123</sup> sugirió por ejemplo, que la conformación de proteínas está regulada por oscilaciones cuánticas de dipolos dentro de los bolsillos hidrofóbicos, lo que les permitiría encontrarse en coherencia cuántica macroscópica. Michael Conrad también ha propuesto que las superposiciones de electrones podrían influir el movimiento nuclear y ha sugerido que puede ocurrir una superposición cuántica de diferentes conformaciones proteicas posibles, antes de que una sea seleccionada.<sup>124</sup> Una investigación sugiere que se pueden mantener estados de coherencia cuántica en la ferritina, una proteína rica en hierro que se usa en la detección de anticuerpos.<sup>125</sup> Más recientemente Matsuno ha propuesto que en la actina puede haber coherencia cuántica magnética.<sup>126</sup>

Si la hipótesis de Penrose y Hameroff es correcta y puede haber coherencia cuántica dentro de los MTs en las neuronas individuales, una pregunta que surge es ¿cómo podría entonces la actividad de los MTs en las neuronas individuales dar lugar a eventos de coherencia cuántica a nivel macroscópico? La conciencia y otros procesos cognoscitivos no son el resultado de neuronas individuales, sino de la actividad neuronal conjunta de diversas regiones cerebrales que pueden estar distanciadas unas de otras.<sup>127</sup> Si —como lo proponen Hameroff y Penrose— la gelación de la actina puede aislar la coherencia cuántica de los MTs dentro de las neuronas individuales, ¿cómo podría ocurrir la coherencia cuántica macroscópica entre los MTs

---

<sup>122</sup> Melki *et al.* 1989.

<sup>123</sup> Fröhlich 1975.

<sup>124</sup> Conrad 1996.

<sup>125</sup> Tejada *et al.* 1996.

<sup>126</sup> Matsuno 2001.

<sup>127</sup> Ver e.g., Edelman y Tononi 2000.

dispersos en las neuronas por todo el cerebro? Una sugerencia de Hameroff involucra el fenómeno cuántico de efecto túnel entre las hendiduras sinápticas y que puede subyacer al disparo sincronizado de las neuronas dispersas en varios sectores cerebrales.

Existen dos principales tipos de sinapsis: (i) química (relacionada con los neurotransmisores) y (ii) eléctrica (o también electrónica). En las sinapsis eléctricas —que constituyen aproximadamente el 15% de las sinapsis en el cerebro—, hay continuidad citoplasmática entre dos neuronas adyacentes por medio de canales de 1.5 nm. Por esta continuidad, los iones pueden fluir entre las células y sus uniones, llamadas uniones de abertura [*gap junctions*]. De estas uniones de abertura, las cuales son de baja resistencia, resultan neuronas acopladas eléctricamente. En estas sinapsis no interviene ningún neurotransmisor. En esencia, no hay retardo sináptico, puesto que la actividad eléctrica se extiende de forma inmediata de neurona a neurona. Y ya que estas sinapsis no pueden ser moduladas por sustancias químicas, no son compatibles con la mayoría de las funciones neuronales. Sin embargo, debido su actividad eléctrica, se encuentran donde la actividad neuronal debe ser muy sincronizada, como en muchas funciones cognitivas (e.g., la conciencia). De este modo, debido a que la corriente eléctrica fluye a través de las membranas de las células eléctricamente acopladas, un grupo de neuronas interconectadas por uniones de abertura puede formar una red neuronal en la cual las células nerviosas disparan de forma sincrónica y “pueden actuar coordinadamente como una gran célula”.<sup>128</sup>

A diferencia de las sinapsis químicas que separan los procesos neuronales por 30-50 nanómetros, en las sinapsis eléctricas las separaciones de las uniones de abertura son de aproximadamente 3.5 nm, rango en el cual se da un fenómeno cuántico conocido como efecto túnel [en inglés, *tunneling*].<sup>129</sup> Siguiendo a otros autores, Hameroff<sup>130</sup> sugiere que si este efecto

---

<sup>128</sup> Kandel y Siegelbaum 2000, p. 180.

<sup>129</sup> También conocido como penetración de barrera, el efecto túnel (véase Roy 1993) constituye un fenómeno en el que las partículas subatómicas pueden atravesar barreras de fuerza que, en principio, son impenetrables. Este fenómeno llamó primero la atención en el caso del decaimiento alfa, un efecto en el que las partículas alfa (núcleos de átomos de helio) pueden escapar de ciertos núcleos atómicos radioactivos. Los componentes del núcleo atómico están unidos por una fuerza que las partículas alfa no tienen suficiente energía para superar. Sin embargo, pueden crear un túnel para atravesar la barrera de fuerza de los componentes del núcleo atómico. Este fenómeno no puede ser explicado mediante las leyes deterministas de la física clásica, por lo que su explicación ha venido de la mecánica cuántica. Sobre la base de la mecánica cuántica las partículas subatómicas pueden hacerse camino a través de las barreras de fuerza aunque sus energías sean muy pequeñas como para hacerlo de manera convencional. Pongamos un ejemplo. En una superficie determinada —digamos, un metal— existe una multitud de electrones casi libres, ligados a sus átomos con relativa debilidad. A pesar de ello, éstos no escapan del metal por sí solos, debido a que la acción conjunta de todos los iones sobre todos los electrones en el metal generan lo que se conoce como *barrera de potencial*, que por analogía sería como una valla que los electrones no pueden brincar. Dentro del metal los electrones se mueven sin dificultad en una condición conocida como pozo de potencial, que asemeja a los hoyos en los que se encuentran las bolas de golf (los electrones). Hay

cuántico subyace a las sinapsis eléctricas<sup>131</sup> y éstas, a su vez, subyacen a la actividad neuronal sincronizada, entonces la conjugación de redes de neuronas interconectadas mediante sinapsis eléctricas y los ciclos de gelación/solución de la actina acopladas a la actividad neuronal sincrónica, podría mantener la coherencia cuántica de los MTs en regiones esparcidas por todo el cerebro.

## 2.6. EL MODELO DE REDUCCIÓN OBJETIVA ORQUESTADA EN LOS MICROTÚBULOS

Ya tenemos los elementos que conforman el modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff. Ahora lo reconstruyo de la siguiente manera:

### 2.6.1. Supuestos iniciales

- (1) *Rasgos enigmáticos de la conciencia.* De acuerdo con Penrose y Hameroff,<sup>132</sup> los modelos actuales, particularmente los modelos neurobiológicos y neurocomputacionales no pueden explicar al menos cinco rasgos enigmáticos del fenómeno de la conciencia: (1) la naturaleza subjetiva de la conciencia o qualía; (2) el enlace de actividades cerebrales espacialmente distribuidas en percepciones unitarias, así como un sentido coherente del sí mismo [*self*] o unicidad [*oneness*]; (3) la transición de procesos preconscientes a la conciencia en sí; (4) la no computabilidad de la conciencia, i.e., la noción de que la conciencia implica un factor que no es ni aleatorio ni computable; (5) la libre voluntad.
- (2) *Computación cuántica.* De acuerdo con la computación cuántica, los estados en un sistema cuántico pueden interactuar (vía el entrelazamiento) y producir cálculos mientras se encuentran en superposición de todos los posibles estados. Mientras que la computación clásica procesa bits (o estados conformacionales) de 1 ó 0, la computación cuántica implica el procesamiento de qubits superpuestos de 1 y 0 simultáneamente. El

---

ocasiones en que los electrones pueden salir del pozo de potencial cuando sobre ellos incide una radiación electromagnética, como en el efecto fotoeléctrico descrito por Einstein. Si embargo, si se aplica un campo eléctrico más fuerte los electrones pueden crear en la barrera de potencial un túnel por el que pueden atravesar sin dificultad. De acuerdo con la física cuántica el efecto túnel se debe a la dualidad onda-partícula.

<sup>130</sup> Hameroff 1998c, 1998f, 2001a, 2001b.

<sup>131</sup> Como lo ha demostrado Evan Harris Walker en lo que podría considerarse como el primer modelo cuántico de la conciencia (Véase Walker 1970, 1977, 2000).

<sup>132</sup> Hameroff y Penrose 2000, p. 48; también Hameroff 1998d, p. 1870.

entrelazamiento cuántico de sistemas (incluso separados a distancia) permite además que haya infinitos cálculos en paralelo. Los resultados cuánticos computacionales se dan cuando los qubits se reducen en estados de bits clásicos. Como la superposición cuántica sólo puede ocurrir en aislamiento del ambiente, la reducción puede ser inducida atravesando o violando el aislamiento. ¿Qué ocurre entonces con las superposiciones cuánticas que permanecen aisladas? La respuesta de Penrose es que la reducción ocurre de manera objetiva y espontánea, vía gravitación cuántica.

- (3) *Reducción Objetiva (RO)*. Actualmente no existe una teoría adecuada sobre la reducción del vector de estado, pero una teoría de reducción objetiva (RO) vía gravedad cuántica podría resultar exitosa para dar cuenta de él. Además, una teoría RO vía gravedad cuántica podría incorporar procesos no computacionales (la existencia de cuasicristales es evidencia de que existen tales procesos). De acuerdo con Penrose,<sup>133</sup> la superposición cuántica persiste hasta que se alcanza un umbral crítico relacionado con la gravedad cuántica y entonces se autocolapsa abruptamente. Según Hameroff y Penrose,<sup>134</sup> el umbral para la RO en un sistema cuántico aislado del ambiente está dado por el principio de indeterminación  $E = \hbar/T$  (donde  $E$  es la energía de la masa en superposición,  $\hbar = h/2\pi$  y  $T$  es el tiempo hasta que ocurre la reducción).  $E$  se puede determinar por la cantidad de masa en superposición y la distancia de separación de la masa de sí misma. Entonces, de acuerdo con el proceso RO de Penrose, los sistemas de gran escala en superposición aislada se colapsarán rápidamente, mientras que los sistemas más pequeños persistirán en superposición por mucho más tiempo.<sup>135</sup> Si en el cerebro ocurren también procesos RO, entonces el tiempo  $T$  para que ocurran eventos conscientes podría encontrarse en el rango de los 10 a los 500 milisegundos.<sup>136</sup>
- (4) *Computación cuántica y RO en el cerebro*. Si la computación cuántica y la RO ocurren en el cerebro, entonces se podrían explicar los rasgos enigmáticos de la conciencia: (1) ocurriendo como un proceso auto-organizativo en un medio panexperiencial de geometría espacio-tiempo fundamental, las RO podrían dar cuenta de los qualia

---

<sup>133</sup> Penrose 1998b.

<sup>134</sup> Hameroff y Penrose 1995, 1996b y 1996c.

<sup>135</sup> e.g., el gato de Schrödinger cuya masa es de  $\approx 1$  kg, colapsará en un tiempo de  $10^{-37}$  seg., en tanto que un protón tardará  $10^7$  años en colapsarse

<sup>136</sup> e.g., 25 ms para las oscilaciones coherentes de 40 Hz, 100 ms para los ritmos electroencefalográficos Alfa y 500 ms para el potencial preparatorio previo a la ejecución de un acto voluntario.

mediante el acceso y la selección de qualia protoconscientes; (2) debido a su rasgo unitario, tanto los estados cuánticos entrelazados (durante los cómputos cuánticos preconscientes) como la unidad de la información cuántica (seleccionada en cada RO), podrían dar cuenta del problema del enlace; (3) el paso de un evento preconsciente a uno consciente podría explicarse mediante la transición de superposiciones computacionales cuánticas a eventos de RO instantáneos, con lo cual, la conciencia podría verse como una secuencia de eventos discretos a 40 Hz; (4) dado que el proceso RO no es computable, las elecciones conscientes y el entendimiento matemático son igualmente no computables; (5) la libre voluntad se puede considerar como una combinación de procesos preconscientes deterministas sobre los cuales actúan influencias no computacionales.

- (5) *Los microtúbulos como computadoras cuánticas.* Si la computación cuántica y la RO ocurren en el cerebro, ¿dónde es que ocurren? Previamente, Hameroff<sup>137</sup> había sugerido que los microtúbulos —formados por dos subunidades proteicas llamadas tubulinas  $\alpha$  y  $\beta$ — podían adoptar al menos dos configuraciones distintas. Si estas configuraciones se hacen equivalentes a los bits 1 y 0 en computación clásica, cada microtúbulo podría comportarse como un autómata celular, es decir, como una computadora que puede ejecutar cómputos simples. Tras la demostración de Penrose de que la computación clásica no puede dar cuenta de la conciencia, Hameroff y Penrose dan un paso más allá y proponen que los microtúbulos en realidad operan como computadoras cuánticas. Según Penrose,<sup>138</sup> esta elección se debe a que los microtúbulos permiten aislar lo que hay en su interior de la actividad aleatoria de su medio, de modo tal que el contenido de los microtúbulos podría permanecer en un estado de superposición cuántica coherente a gran escala, por lo cual, los microtúbulos parecen comportarse como computadoras cuánticas. Sin embargo, esta actividad no sólo serviría para ejecutar cómputos cuánticos, sino que, debido al elevado grado de coherencia, se extendería sobre regiones muy amplias del cerebro y podría dar lugar a una actividad cuántica a gran escala, en virtud del efecto de la no localidad cuántica, debida al entrelazamiento.

---

<sup>137</sup> Hameroff y Watt 1982; Hameroff 1987.

<sup>138</sup> Penrose 1994 y 1997b.

### **2.6.2. Reducción objetiva orquestada en los microtúbulos (el modelo R0 Orq de la conciencia)**

Con los elementos dados en 1-5, Penrose y Hameroff proponen entonces su modelo cuántico de la conciencia, el cual tiene los siguientes puntos clave:

- (1) Los estados conformacionales de las proteínas de tubulina individuales en los microtúbulos cerebrales, están gobernados por eventos cuánticos internos (e.g., fuerzas London en los bolsillos hidrofóbicos) y son capaces de interactuar cooperativamente con otras tubulinas en dos tipos de fases: computación clásica y computación cuántica. La fase de computación clásica (en la que los MTs actúan como autómatas) se lleva a cabo en comunicación con el ambiente externo, recibiendo la entrada de, y regulando la salida hacia, las sinapsis químicas y otras actividades de membrana neuronales. En esta fase el citoplasma que rodea y contiene los MTs se encuentra en un estado sol.
- (2) En la fase de computación cuántica, la gelación de la actina, el agua ordenada y una fase de carga condensada aíslan los MTs de la descoherencia ambiental. La fase de aislamiento cuántico/gelación puede ser disparada por la influencia sináptica a través del desacoplamiento de las proteínas asociadas a microtúbulos (tales como las MAP 2). En la fase de aislamiento los MTs están incrustados en un estado gelatinoso (gel), desacoplado del ambiente externo. Entonces, las transiciones sol-gel en el citoplasma (una actividad básica de todas las células del organismo), modifica el ambiente de los MTs entre fases alternantes de computaciones clásica y cuántica a frecuencias que son consistentes con eventos neurofisiológicos de sincronización neuronal (e.g., a 40 Hz).
- (3) En la fase cuántica (gel), la superposición cuántica coherente surge entre las fuerzas London en los bolsillos hidrofóbicos de las subunidades de tubulina (e.g., del modo descrito por Fröhlich 1975). La superposición de los electrones de la fuerza London dentro de cada bolsillo hidrofóbico, induce la superposición de la estructura atómica de las tubulinas. Cada tubulina se separa de sí misma al nivel de cada uno de los átomos de su núcleo, y las superposiciones alternantes corresponden (y dan lugar) a conformaciones post-OR alternantes. Cada tubulina funciona entonces como un qubit, implicado en computaciones cuánticas con otras tubulinas en estado de coherencia cuántica. En esta fase, la computación cuántica entre las tubulinas evoluciona de acuerdo con la ecuación lineal de Schrödinger (con los MTs actuando como autómatas cuánticos).

- (4) Los estados de superposición/computación cuántica de los MTs en diferentes regiones neuronales se enlazan vía efecto túnel a través de las uniones de abertura o a través de fotones en coherencia cuántica que cruzan las membranas celulares (Jibu, Hagan y Yasue, 1996; Jibu *et al.* 1994). Esto permite que los estados cuánticos se extiendan en las redes de células (neuronas y glía) conectadas transitoriamente por uniones de abertura, en diferentes regiones por todo el cerebro.
- (5) La fase de superposición cuántica en los MTs neuronales corresponde al procesamiento preconsciente, en el cual todos los posibles resultados se mantienen superpuestos. Esta superposición cuántica preconsciente persiste hasta que se alcanza un umbral crítico relacionado con la gravedad cuántica y entonces se autocolapsa abruptamente. Esta fase de reducción objetiva (RO) es un evento discreto y durante ella se disuelve la actina gel y los estados post-RO (elegidos no algorítmicamente) son seguidos por autómatas microtubulares clásicos que regulan las sinapsis y otras actividades de membrana neuronal (en la fase líquida del citoplasma). El modelo propone que estos eventos son sucesos conscientes discretos (que tienen qualia o experiencia) por razones que se relacionan con una fusión entre la física moderna y una filosofía panexperencial (Hameroff 1998c, 1998d). Una secuencia de estos sucesos constituye un flujo de conciencia.
- (6) Las probabilidades para la superposiciones cuánticas preconscientes están influidas por la retroalimentación biológica, que incluye la integración de proteínas asociadas a microtúbulos (MAPs) las cuales, al modificar las tubulinas seleccionadas en la fase clásica, pueden sintonizar y orquestar las oscilaciones cuánticas. El proceso RO auto-sintonizado en los microtúbulos se llama entonces reducción objetiva orquestada o RO Orq.
- (7) El umbral para la RO en un sistema cuántico aislado del ambiente está dado por el principio de indeterminación  $E = \hbar/T$  (donde  $E$  es la energía de la masa en superposición,  $\hbar = h/2\pi$  y  $T$  es el tiempo hasta que ocurre la reducción).  $E$  se puede determinar por la cantidad de masa en superposición y la distancia de separación de la masa de sí misma. De acuerdo con el proceso RO de Penrose, los sistemas de gran escala en superposición aislada se colapsarán rápidamente, mientras que los sistemas más pequeños persistirán en superposición por mucho más tiempo (e.g., el gato de Schrödinger cuya masa es de  $\approx 1$  kg, colapsará en un tiempo de  $10^{-37}$  seg., en tanto que un protón tardará  $10^7$  años en colapsarse).

- (8) Los eventos de RO Orq pueden ser de una intensidad y duración variables de procesamiento preconsciente. Calculando a partir de  $E = \hbar/T$ , para el tiempo de un procesamiento preconsciente de  $T = 25$  ms (que corresponde a intervalos con oscilaciones de 40 Hz),  $E$  sería aproximadamente la superposición de  $2 \times 10^{10}$  tubulinas. Para  $T = 100$  ms (que corresponde a las frecuencias electroencefalográficas alfa, 7.5-12.5 Hz),  $E$  implicaría la superposición de aproximadamente  $5 \times 10^9$  tubulinas. Para  $T = 500$  ms (que corresponde al potencial preparatorio previo a la ejecución de un acto voluntario, según las investigaciones de Libet 2003, 2004),  $E$  equivaldría a la superposición de alrededor de  $10^9$  tubulinas. Entonces, de acuerdo con el modelo RO Orq,  $2 \times 10^{10}$  tubulinas mantenidas en superposición cuántica coherente aislada para 25 ms ( $5 \times 10^9$  tubulinas para  $T = 100$  ms o  $10^9$  tubulinas para  $T = 500$  ms, etc.) se autocolapsará y provocará un evento consciente. El intervalo entre sucesos conscientes (o la duración de cada evento consciente, si se incluye el tiempo del procesamiento preconsciente) varía inversamente con la cantidad de tubulinas en superposición e intensidad de la experiencia.
- (9) Se estima que un MT neuronal, de típicamente 100 nm de longitud, puede albergar poco más de  $10^5$  subunidades de tubulina (Tuszyński, Brown y Hawrylak 1998). De acuerdo con el modelo RO Orq, si por ejemplo el 10% de las tubulinas de cada neurona se hiciera coherente, entonces para un evento consciente de 13 ms (e.g., un momento de percatación budista<sup>139</sup>) se requeriría una RO Orq de las tubulinas dentro de aproximadamente 40,000 neuronas (conectadas mediante uniones de abertura)  $\approx 20,000$  neuronas para un evento consciente de 25 ms (e.g., oscilaciones coherentes a 40 Hz),  $\approx 5,000$  neuronas para un suceso de 100 ms (e.g., frecuencias EEG alfa) y  $\approx 1,000$  neuronas para uno de 500 ms (umbral sensorial de Libet), etc.
- (10) Cada suceso de RO Orq instantáneo enlaza información superpuesta, codificada en los MTs a través de la hiperneurona cuyo desplazamiento de red alcanza un umbral en un momento particular: una variedad modos diferentes de información es entonces enlazado en un suceso 'ahora'. Dado que los estados de reducción cuántica son irreversibles en el

---

<sup>139</sup> Hameroff y Penrose 2000, p. 57.

tiempo, las cascadas de sucesos RO Orq presentan un flujo temporal hacia delante y un flujo de conciencia (Elitzur 1996; Tollaksen 1996).<sup>140</sup>

- (11) De acuerdo con los argumentos de Penrose en *Shadows* (Penrose 1994), cada estado superpuesto tiene su propia geometría espaciotemporal. Cuando el grado de diferencia masa-energía coherente conduce a una separación suficiente de la geometría del espacio-tiempo, el sistema debe elegir y decaer (i.e., reducirse) en un solo estado del universo. La RO Orq implica entonces auto-selecciones en la geometría espaciotemporal fundamental.
- (12) Siguiendo un enfoque panexperencialista que viene desde Spinoza y Leibniz, hasta Whitehead y Chalmers, el modelo RO Orq asume que los qualia son un componente fundamental del universo y que por lo tanto son constitutivos de la geometría del espacio-tiempo. El modelo de redes de espín de Penrose (1971) al volumen de escala de Planck (Markopoulou y Smolin 2004; Smolin 2004), puede ser una posible composición básica de la realidad física, adecuada para contener qualia o experiencia cruda (mónadas cuánticas). Cada evento RO Orq es una auto-configuración de la geometría ‘fundamental’ (Hameroff 1998c, 1998d).

El modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff ha recibido, como cualquier otro modelo de la conciencia, críticas desde diversos frentes. La parte que más comentarios críticos ha tenido, principalmente por parte de los filósofos, es la tesis de la no computabilidad de la conciencia de Penrose.<sup>141</sup> El modelo de Hameroff y Penrose como tal ha sido menos comentado por los críticos.<sup>142</sup> En el siguiente capítulo presento mi propia evaluación crítica del modelo, basado en cierta evidencia neurofisiológica y neuropsicológica.

---

<sup>140</sup> Cf. Klein 1999, para un punto de vista no cuántico, y Wolf 1999, para un enfoque cuántico.

<sup>141</sup> Véase por ejemplo el simposio en la revista electrónica *Psyche* sobre el libro *Shadows*, vol. 2, mayo 1995 (<http://psyche.cs.monash.edu.au/psyche-index-v2.html>).

<sup>142</sup> Véase e.g., Churchland 1998; de Morais Ribeiro 2001; Grush y Churchland 1995; Pastor-Gómez 2002; Tegmark 2000.

## El modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff: una evaluación crítica

---

Como se vio en el capítulo anterior, el modelo de Penrose y Hameroff tiene una cantidad de detalles técnicos que interconectan datos provenientes de diversas disciplinas, desde las matemáticas y la física cuántica, hasta la neurobiología y la bioquímica. Sólo en un trabajo más extenso se podrían analizar críticamente todos los detalles del modelo. Sin embargo, basado en ciertos datos provenientes de la investigación neurofisiológica, yo encuentro algunos problemas que lo pueden poner en dificultades:

- (1) No hay evidencia que relacione directamente alguna alteración de las estructuras microtubulares con perturbaciones de la conciencia. Por el contrario, una alteración del funcionamiento normal de los MTs se relaciona fuertemente con enfermedades neurodegenerativas.
- (2) La coherencia cuántica a gran escala en el cerebro es insuficiente para el surgimiento de la conciencia, ya que una actividad hipersincrónica (a la que subyace una gran coherencia cuántica en los MTs) no corresponde a ningún tipo de actividad consciente, sino a crisis epilépticas generalizadas.
- (3) Las oscilaciones de 40 Hz se han postulado como el proceso que subyace al enlace temporal de diversas regiones cerebrales, para dar lugar a una experiencia consciente unificada (hipótesis de la correlación temporal). Sin embargo, esta propuesta tiene algunos problemas metodológicos y teóricos, y no es la única que puede explicar el problema del enlace.
- (4) De acuerdo con Hameroff, la conciencia puede depender de procesos cuánticos en los bolsillos hidrofóbicos, los cuales pueden ser inhibidos por ciertas sustancias químicas, dando lugar a la anestesia general. Esta hipótesis adolece de dos problemas: (i) hay evidencia de que la anestesia general actúa en otros sitios que no involucran las estructuras microtubulares y (ii) durante la anestesia general no sólo la conciencia se ve afectada, sino el resto de las funciones cognitivas como el pensamiento, el lenguaje, la percepción, la memoria.

### 3.1. ALTERACIONES DEL FUNCIONAMIENTO MICROTUBULAR NO CONDUCEN A PERTURBACIONES DE LA CONCIENCIA

Si la hipótesis de Penrose y Hameroff es correcta, y los eventos conscientes son el resultado directo de los procesos de reducción objetiva en los microtúbulos (procesos sintonizados u orquestados por las subunidades proteicas de tubulina), entonces cualquier alteración en estos (o en sus subunidades proteicas) que modifique o impida de algún modo los procesos de reducción objetiva, debería resultar en la modificación del funcionamiento normal de la conciencia, modificación que podría ir desde los llamados estados alterados de conciencia hasta las alteraciones neuropatológicas (e.g., neuropsiquiátricas). Sin embargo, no existe evidencia que relacione directamente alguna alteración en las estructuras microtubulares con la modificación anormal o patológica de la conciencia. En cambio, una cantidad de investigaciones ha demostrado que la alteración en el funcionamiento normal de los microtúbulos, particularmente en relación con las proteínas asociadas a microtúbulos o MAPs, se relaciona fuertemente con las enfermedades neurodegenerativas.

Por ejemplo, diversos estudios microscópicos de los encéfalos de pacientes con enfermedad de Alzheimer, han revelado que esta enfermedad se caracteriza por un tipo específico de degeneración neuronal llamada degeneración neurofibrilar, en la cual el citoesqueleto de algunas neuronas se va alterando de manera progresiva y da lugar al surgimiento de una serie de espirales anormales de filamentos que forman una disposición enredada en las células nerviosas. Estas espirales anormales se denominan ovillos neurofibrilares y las neuronas con estos ovillos carecen de microtúbulos. Los ovillos neurofibrilares están compuestos principalmente por la MAP *tau* en un estado anormal de fosforilación.<sup>143</sup> Alteraciones similares de la proteína tau también parecen ser la característica definitoria (a nivel bioquímico) de otras enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Pick y la demencia frontotemporal. Por esa razón las enfermedades neurodegenerativas se conocen en ocasiones también como taupatías. Algunos estudios genéticos han establecido una relación entre la disfunción de la tau y el par cromosómico 17, que también parece relacionarse con la muerte celular y la enfermedad de Parkinson.<sup>144</sup>

---

<sup>143</sup> La fosforilación es una reacción mediante la cual un grupo de fosfato queda unido covalentemente a otra molécula.

<sup>144</sup> Alonso *et al.* 1997; Goedert 2003; Johnson y Hartigan 1999; Panda *et al.* 2003; Puig *et al.* 2005.

Otra enfermedad neurodegenerativa, y que parece asociarse con el monómero  $\beta$ -tubulina de los MTs, es la enfermedad de Huntington. Esta enfermedad fue una de las primeras patologías cuyo origen fue rastreado hasta un solo gene.<sup>145</sup> La enfermedad de Huntington se advierte al principio en cambios conductuales muy sutiles: pequeñas sacudidas de la cara y una cierta torpeza motora. La sutilidad se pierde rápidamente y pasa a ser una continua corriente de espasmos involuntarios que afectan a todo el cuerpo llamada ‘corea’. Los movimientos sin objeto de los ojos, movimientos espasmódicos de las piernas y el retorcimiento del cuerpo hacen complicada la respiración y la alimentación en los pacientes afectados. Con bastante frecuencia se hace evidente una marcada demencia. Neuroanatómicamente, la enfermedad de Huntington implica la muerte neuronal en el núcleo caudado, una parte de los ganglios basales involucrada en la regulación de los movimientos voluntarios, lo que parece ser la causa de la corea.<sup>146</sup>

El gene<sup>147</sup> relacionado con la enfermedad de Huntington codifica una proteína llamada huntingtina, cuya función aún se desconoce. Un grupo de investigadores en la Universidad René Descartes en París, parece haber demostrado que la huntingtina se combina específicamente con la subunidad proteica  $\beta$ -tubulina de los MTs, por lo que en las microscopías de los cerebros de pacientes con esta enfermedad, la huntingtina se muestra ensamblada a los MTs. Estos investigadores mostraron que la mayor parte de esta proteína en el citoplasma está asociada con los MTs y que es particularmente abundante en la región perinuclear citoplasmática, así como en el centrosoma, donde además se conjuga con la otra subunidad proteica de los MTs, la  $\gamma$ -tubulina. En la enfermedad de Huntington, las inclusiones de la huntingtina son principalmente nucleares o perinucleares y esto parece deberse a que la  $\beta$ -tubulina atrae a la huntingtina especialmente a esas regiones en el citoplasma, desde donde tienen acceso al núcleo de las neuronas.

---

<sup>145</sup> George Huntington fue el médico quien describió por primera vez esta grave enfermedad. En la que fue su única publicación (en 1884) donde describía una extraña aflicción motora de un familiar cercano, Huntington observó correctamente que esta enfermedad se trataba de un trastorno neurológico heredado que se transmitía de una generación a otra. Hoy se sabe que esta enfermedad se transmite por un gen dominante simple (identificado en el cromosoma 4) por lo que cada hijo de una víctima tiene una probabilidad del 50% de desarrollar la enfermedad. Usualmente hace su primera aparición entre los 30 y 45 años de edad con lo que la mayoría de los enfermos ya han tenido hijos sin saber si en última instancia sucumbirán al trastorno. Esto, por desgracia, asegura la continuación de generaciones de individuos afectados, a menos que se desarrolle alguna técnica que pueda informar a los descendientes de los pacientes sobre su susceptibilidad genética a la enfermedad (Gillian, Kandel y Jessell 2000, pp. 52-55).

<sup>146</sup> DeLong 2000, esp., pp. 864-866.

<sup>147</sup> Identificado en el cromosoma 4.

### 3.2. LA COHERENCIA CUÁNTICA A GRAN ESCALA EN EL CEREBRO ES INSUFICIENTE PARA EL SURGIMIENTO DE LA CONCIENCIA

Recordemos que, de acuerdo con Hameroff,<sup>148</sup> la coherencia cuántica de los MTs en regiones esparcidas en todo el cerebro se explica por dos cosas: (i) el efecto túnel, que subyace a las sinapsis eléctricas, las que a su vez subyacen a la actividad neuronal sincrónica que es esencial para los sucesos conscientes y (ii) los ciclos de gelación/solución de la actina acopladas a esta actividad sincrónica. Según el modelo de Penrose y Hameroff, si la coherencia cuántica puede ser mantenida en amplias regiones cerebrales, el tiempo  $T$  (de acuerdo con su fórmula  $E = \hbar/T$ ) para que ocurran eventos conscientes podría encontrarse en el rango de 10-500 ms (e.g., 25 ms para las oscilaciones de 40 Hz, 100 ms para las frecuencias EEG alfa y 500 ms para el potencial preparatorio previo a la ejecución de un acto voluntario).

El punto central de esta parte del modelo es que la actividad sincrónica es imprescindible para el surgimiento de eventos conscientes y que esta actividad se debe, a su vez, a la coherencia cuántica de los MTs en diversas regiones cerebrales. Además, de acuerdo con Penrose y Hameroff, uno de los rasgos enigmáticos de la conciencia es precisamente el enlace de actividades cerebrales espacialmente distribuidas en percepciones unitarias y en un sentido coherente del sí mismo [*self*]. Así mismo, de acuerdo con su modelo, los sucesos RO Orq pueden ser de una duración e intensidad variables. Por ejemplo, la experiencia consciente ‘normal’ transcurre a 40 Hz y ésta puede ser interrumpida por los anestésicos hidrofóbicos. Un incremento en la tasa de emergencia de superposición cuántica coherente, correspondería a una experiencia elevada [*heightened experience*]. Los estados alterados de conciencia corresponderían a una tasa todavía mayor de emergencia de coherencia cuántica debido a entradas sensoriales y otros factores que promuevan el estado cuántico (e.g., meditación, drogas psicodélicas, etc.). El sueño sería una prolongación del tiempo de la coherencia cuántica (Figura 6).

---

<sup>148</sup> Hameroff 1998c, 1998f, 2001a, 2001b.

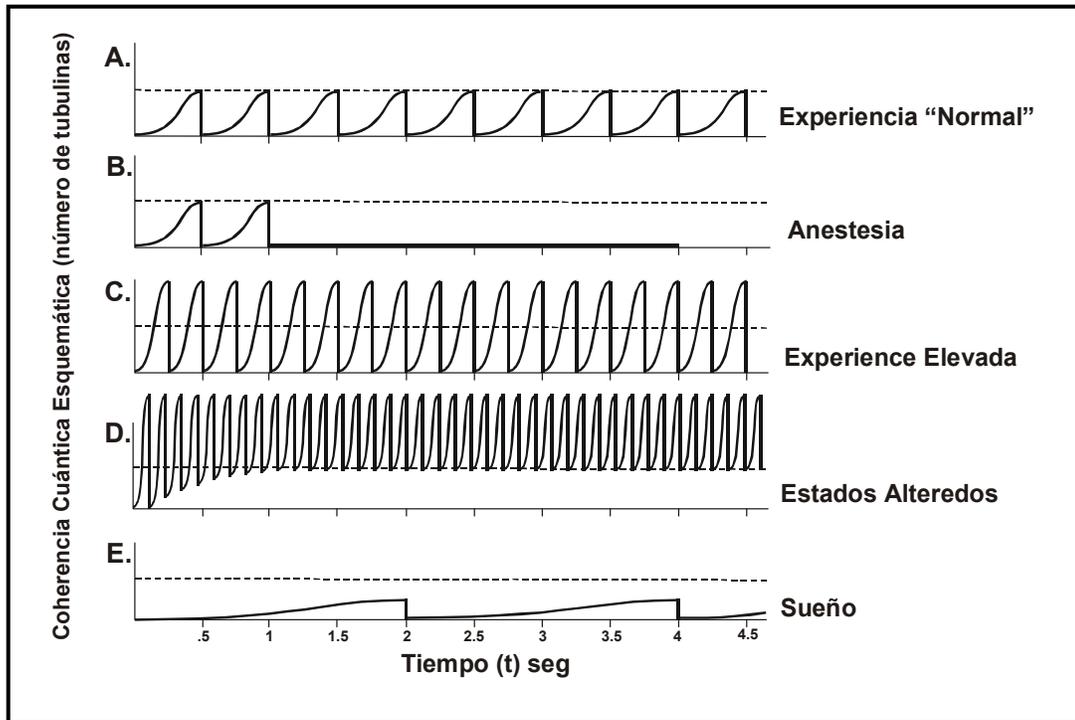


FIGURA 6. Coherencia cuántica en los microtúbulos en una escala temporal en segundos para cinco diferentes estados conscientes (modificado de Hameroff y Penrose 1996a, 1996b).

Lo importante es la sincronía neuronal y la coherencia cuántica que le subyace, pudiendo ser de diferentes duraciones e intensidades que corresponden a diversos estados de conciencia. Sin embargo, ¿son imprescindibles la coherencia cuántica a gran escala y la actividad sincrónica para la conciencia?

En algunos cerebros se puede presentar de hecho una actividad hipersincrónica. Si la hipótesis de Penrose y Hameroff es correcta, entonces a esta actividad hipersincrónica debería subyacerle una gran coherencia cuántica a gran escala en diversos sectores cerebrales. En los cerebros donde se presenta esta actividad, las neuronas descargan durante breves períodos en la mayor parte de las regiones de la corteza cerebral y el tálamo, y se dice que es hipersincrónica porque la mayoría de las neuronas disparan a tasas elevadas y casi simultáneamente. El patrón EEG ictal (i.e., durante el tiempo que dura la actividad hipersincrónica) característico de esta actividad denominada paroxística, está constituido por una actividad rítmica rápida de 10 Hz o más.

Ahora, si seguimos los cálculos del modelo de Penrose y Hameroff, esta actividad neuronal hipersincrónica corresponde a un tiempo  $T = 100$  ms, y a una energía de la masa en superposición  $E = 4 \times 10^{10}$  tubulinas ( $\approx 5,000$  neuronas) y debería entonces corresponder a una gran coherencia cuántica en los MTs de todas las regiones corticales y talámicas involucradas.

Además, si la coherencia cuántica es esencial para la conciencia, entonces esta actividad neuronal hipersincrónica debería subyacer a sucesos conscientes muy especiales, una especie de hiperconciencia y un mayor sentido del sí mismo. Sin embargo, esto no es así, ya que esta actividad hipersincrónica no corresponde a sucesos conscientes discretos ni a ningún flujo de conciencia. Una persona en cuyo cerebro se presenta esta actividad hipersincrónica en realidad está atravesando por una crisis epiléptica generalizada que abarca ambos hemisferios cerebrales, y no sólo su conciencia, sino de hecho prácticamente todas sus funciones cognoscitivas y motoras se ven interrumpidas por un lapso de tiempo (que puede ir desde unos segundos hasta algunos minutos). Hay muchos tipos de epilepsias, y los síntomas y patrones EEG varían debido a muchos factores, como la edad y la etiología.<sup>149</sup> Durante una crisis generalizada tónico-clónica, el cuadro que presenta una persona que atraviesa por una suele ser dramático: los músculos de todo el cuerpo se contraen repentinamente, produciendo rigidez de los miembros y del cuerpo; esta fase tónica del ataque es seguida por una fase clónica que consiste en repetidas sacudidas y relajaciones alternadas del cuerpo. El patrón EEG, como ya lo vimos, es de ritmos rápidos de 10 Hz o más al inicio que van disminuyendo en frecuencia y aumentando en amplitud durante la fase tónica, interrumpiéndose por ondas lentas durante la fase clónica y apareciendo además posteriormente puntas independientes y múltiples, sincrónicas con las sacudidas de la persona.<sup>150</sup> A nivel cuántico y siguiendo el modelo RO Orq, esta actividad corresponde a una gran coherencia cuántica que se extiende en los dos hemisferios cerebrales y abarca muchas regiones corticales y talámicas, pero donde la conciencia se ve interrumpida. Esto significa entonces que la coherencia cuántica a gran escala en el cerebro y la sincronía neuronal, no son suficientes para el surgimiento de la conciencia.

### 3.3. DIFICULTADES CON LA HIPÓTESIS DE LA CORRELACIÓN TEMPORAL

Volviendo de nueva cuenta a la cuestión de la sincronización neuronal, según el modelo RO Orq, una experiencia consciente normal se presenta cuando la coherencia cuántica en los MTs neuronales se da en un tiempo  $T = 25$  ms, y a una energía de la masa en superposición  $E = 2 \times 10^{10}$  tubulinas ( $\approx 20,000$  neuronas). Esta coherencia cuántica corresponde a una actividad neuronal bajo la forma de oscilaciones coherentes de 40 Hz, frecuencia a la cual, de acuerdo

---

<sup>149</sup> Escotto Córdova 1999; Westbrook 2000.

<sup>150</sup> Collado Corona, Shkurovich Zaslavsky y Reyes Báez 1997; Escotto Córdova 1999.

con un enfoque predominante en los estudios neurocientíficos de la conciencia, se enlazan temporalmente muchas regiones cerebrales para dar lugar a una percepción unitaria.

Esta propuesta intenta resolver el llamado problema del enlace [*binding problem*] en las neurociencias contemporáneas. Penrose y Hameroff retoman esta propuesta *tout court* y añaden que, debido a su rasgo unitario, tanto los estados cuánticos entrelazados (durante los cálculos cuánticos preconscientes) como la unidad de la información cuántica (seleccionada en cada RO), podrían dar cuenta del problema del enlace. Así, en este modelo, un suceso instantáneo enlaza información superpuesta en un suceso unitario ‘ahora’. Cada uno de estos sucesos unitarios es un evento consciente discreto al que le subyace una actividad neuronal coherente a 40 Hz. La elección de Penrose y Hameroff de esta propuesta obedece a que esta actividad neuronal oscilatoria encaja con sus cálculos al utilizar su principio de indeterminación  $E = \hbar/T$ . Sin embargo, la propuesta de los 40 Hz no es la única que da cuenta del problema enlace y además parece tener algunas dificultades.

Cuando vamos caminando por la calle tenemos la imagen total de una escena y no fragmentos de ella, es decir, no percibimos primero un sonido y después otro, después un olor y luego una imagen visual, sino que tenemos conciencia de una escena en un momento dado como un todo único. Toda la información de las diferentes modalidades sensoriales entra al cerebro a través de los órganos de los sentidos, es fragmentada según las modalidades, es analizada y procesada de forma paralela en diversas zonas cerebrales, para después ser integrada como una experiencia unificada y coherente. El problema de cómo es que experimentamos una escena unívoca en lugar de fragmentos es precisamente el llamado problema del enlace, y neurocientíficamente consiste en la cuestión sobre los mecanismos que enlazan o ligan las diferentes áreas del cerebro dedicadas a las diversas modalidades sensoriales, de manera tal que la imagen de la realidad se reconstruya pudiendo ser experimentada como una unidad perceptual unificada y no como un segmento de experiencia tras otro.<sup>151</sup>

Aunque existen opiniones diversas, un número de investigadores coincidió en señalar que la solución al problema del enlace es un mecanismo que consiste en el disparo sincrónico (simultáneo) y correlacionado de todas los sistemas neuronales implicados en la identificación y el análisis de los diversos atributos y cualidades de los objetos, de tal forma que la percepción de algún objeto o situación resulta en una experiencia consciente unívoca y coherente.<sup>152</sup>

---

<sup>151</sup> Véase Hardcastle 1998; Hummel 1999; Singer 2001; Treisman 1996.

<sup>152</sup> Véase e.g., Gray y Di Prisco 1997; Niebur, Hsiao y Johnson 2002; Singer 1999a, 1999b.

El disparo sincrónico y correlacionado se basa en la idea de que lo que importa no es solamente la tasa media de disparos de una célula nerviosa, sino los momentos exactos en los cuales dispara cada neurona. Por ejemplo, cuando vemos dos objetos, las neuronas asociadas con las propiedades de uno de ellos dispararán todas en el mismo momento, mientras que las neuronas asociadas al segundo objeto se dispararán también juntas, pero en instantes diferentes a las del primer conjunto. De esta manera, las demás regiones del cerebro no confundirán a las neuronas del primer grupo con las del segundo, porque ninguno de los dos grupos se dispara en el mismo momento. Esta idea fue sugerida a principios de los años 1980 por el neurofisiólogo alemán Christoph von der Malsburg.<sup>153</sup> El principal requisito teórico de esta propuesta es la correlación del disparo, que parece lograrse más fácilmente mediante el uso de las oscilaciones.

A finales de la década de 1980, la hipótesis del disparo correlacionado comenzó a documentarse en los sistemas olfativo y visual de gatos y monos. En estos estudios se observó que las respuestas neuronales a los estímulos visuales que están correlacionados en una escala temporal en milisegundos, se dan en diversas áreas de la corteza cerebral de los mamíferos.<sup>154</sup> Esta actividad coherente a menudo toma la forma de descargas o disparos sincrónicos, rítmicos y oscilatorios que ocurren principalmente en la banda de frecuencias gamma entre 30 y 70 Hz o ciclos por segundo, por lo cual recibieron el nombre de oscilaciones gamma o de forma menos precisa oscilaciones de 40 Hz.

Las investigaciones hechas con gatos y monos han proporcionado evidencia de que una extensa cantidad de neuronas del área visual primaria (V1) o área 17 de Brodmann (en los humanos), despliegan oscilaciones de 40 Hz. Estas oscilaciones neuronales puedan sincronizarse a través de columnas de células nerviosas espacialmente separadas dentro de V1, dependiendo de la configuración particular del estímulo visual. Basados en esta evidencia, los investigadores llegaron a la conclusión de que los disparos correlacionados y sincrónicos constituyen entonces el substrato fisiológico del mecanismo del enlace. Wolf Singer y Charles Gray<sup>155</sup> llamaron a esta propuesta hipótesis de la correlación temporal (desde aquí, HCT).

En 1990, el recientemente desaparecido Francis Crick entonces en el Instituto Salk para Estudios Biológicos en San Diego y su colega Christof Koch del Instituto de Tecnología de

---

<sup>153</sup> Véase von der Malsburg 1995.

<sup>154</sup> Eckhorn *et al.* 1988; Gray *et al.* 1989.

<sup>155</sup> Singer y Gray 1995.

California, sugirieron que las oscilaciones gamma constituyen el correlato neuronal de la conciencia.<sup>156</sup>

La HCT no está exenta de problemas y además no es la única solución al problema del enlace.<sup>157</sup> Si las objeciones son correctas, las oscilaciones de 40 Hz bien pueden no ser el tan ansiado correlato neuronal de la conciencia (como lo llaman algunos autores)<sup>158</sup> y el modelo de Penrose y Hameroff se vería también en dificultades.

Uno de los problemas con la HCT tiene que ver con las técnicas de registro electrofisiológico como el EEG y la magnetoencefalografía, usadas en la investigaciones de las oscilaciones de 40 Hz. Por ejemplo, de acuerdo con Juergen Fell y sus colegas en Bonn, Alemania,<sup>159</sup> la actividad EEG es más compleja que la que plantean los defensores de la HCT. La complejidad del EEG, según estos autores, tiene dos aspectos: uno temporal y otro espacial. La complejidad temporal implica que la actividad electrofisiológica del cerebro consiste no en una sola gama discreta de frecuencia, sino en la superposición y coexistencia de oscilaciones independientes. Independiente, en este contexto, significa que los ritmos cerebrales que se observan no son sólo armónicos o subarmónicos de una oscilación fundamental (e.g., oscilaciones de 40 Hz), sino que la actividad EEG de nuestros cerebros presenta prácticamente todas las bandas de frecuencias y es la técnica de registro que estemos usando la que las hace independientes.<sup>160</sup>

El otro aspecto, la complejidad espacial, implica que la actividad neuronal no es homogénea, sino que está topográficamente diferenciada por todo el cerebro. Matemáticamente, esta complejidad puede ser cuantificada calculando lo que Grassberger y Procaccia<sup>161</sup> llamaron dimensión de correlación y que es utilizada por los enfoques de sistemas dinámicos no lineales en las neurociencias y las ciencias cognoscitivas.<sup>162</sup> Durante una crisis

---

<sup>156</sup> Crick y Koch 1995. Crick y Koch pronto descartaron esta posibilidad y propusieron que estas oscilaciones juegan más bien un papel indirecto y pueden ayudar al sistema visual a distinguir la figura del fondo o quizá asistir al mecanismo de la atención. Este cambio en su concepción se debe a que encontraron evidencia, particularmente en monos macacos, de que en realidad no nos percatamos de la actividad neuronal que ocurre en la corteza visual primaria (área 17 de Brodmann o área V1) y que por consiguiente esta región no da lugar a la conciencia (Crick y Koch 1995).

<sup>157</sup> Véase e.g., Shadlen y Movshon 1999.

<sup>158</sup> Véase e.g., Block 1996; Chalmers 1998, 2000; Frith, Perry y Lumer 1999; Rees, Kreiman y Koch 2002.

<sup>159</sup> Fell, Fernández y Elger 2003.

<sup>160</sup> Esta observación se la debo al profesor Alejandro Escotto-Córdova de la Facultad de Estudios Superiores de la UNAM (comunicación personal).

<sup>161</sup> Grassberger y Procaccia 1983.

<sup>162</sup> Dafilis, Liley y Cadusch 2001; Gu *et al.* 2003; Morariu *et al.* 2001; Walling y Hicks 2003.

epiléptica, tanto la complejidad temporal como la espacial se ven dramáticamente reducidas<sup>163</sup> provocando una interrupción de diversas funciones cognoscitivas. De igual modo, en estados inconscientes como el sueño profundo o la anestesia general, ambos requisitos (i.e., complejidad temporal y espacial) no se cumplen. Durante esos estados son predominantes las ondas lentas<sup>164</sup> y todo el cerebro parece involucrarse en una oscilación sincrónica unitaria.

Un problema con la HCT y que plantea una dificultad importante para el modelo de Penrose y Hameroff, es que existe evidencia de que las oscilaciones  $\gamma$  se presentan en individuos bajo anestesia general. Por ejemplo, a partir de estudios en el sistema olfativo, se sabe que las oscilaciones rápidas en la banda de frecuencias  $\beta$  (15-40 Hz en ratas despiertas) y gamma, son prominentes en los potenciales de campo inducidas por olores, tanto en el bulbo olfativo como en la corteza periforme del sistema olfativo de los mamíferos.<sup>165</sup> En una investigación hecha con ratas, se descubrió que ambas bandas de frecuencias pueden ser inducidas en los animales anestesiados por uretano.<sup>166</sup> Mediante análisis de concentración de olores y métodos espectrales, se observó que las oscilaciones  $\beta$  y  $\gamma$  se pueden distinguir perfectamente y que no están armónicamente relacionadas, lo que indica que son generadas por mecanismos diferentes. Estos investigadores descubrieron también que si se interrumpe quirúrgicamente el tracto olfativo lateral, cesan las oscilaciones  $\beta$ , pero se mantienen las oscilaciones  $\gamma$ .

En otro estudio se descubrió que las oscilaciones  $\gamma$  pueden presentarse en el sistema auditivo talamo-cortical de ratas anestesiadas. Bajo anestesia con pentobarbital, altas dosis de diazepam y uretano, las oscilaciones  $\gamma$  (tanto inducidas como espontáneas) se observaron en más de la mitad de las ratas estudiadas.<sup>167</sup> También en humanos se han registrado las oscilaciones  $\gamma$  en el sistema auditivo en sujetos anestesiados. Por ejemplo, se ha observado que bajo anestesia con katemina, la respuesta auditiva en la banda  $\gamma$  no sólo se mantiene, sino que su amplitud se incrementa.<sup>168</sup>

---

<sup>163</sup> Cerf *et al.* 1999; Le Van Quyen *et al.* 1999; Martinerie *et al.* 1998.

<sup>164</sup> Escotto Córdova 1999.

<sup>165</sup> Freeman 1995.

<sup>166</sup> Neville y Haberly 2003.

<sup>167</sup> Cotillon-Williams y Edeline 2003.

<sup>168</sup> Plourde, Baribeau y Bonhomme 1997.

Resultados similares parecen indicar, como señala Joseph Bogen,<sup>169</sup> que quizá la sincronía no nos dice mucho sobre la conciencia debido a que, en primer lugar, la percepción y el uso de perceptos en la conducta compleja pueden proceder sin la participación de la conciencia y en segundo lugar, aunque son más evidentes durante el estado de alerta, la existencia de las oscilaciones  $\gamma$  durante la anestesia las convierte en un indicativo ambiguo sobre la conciencia, no importando cuan importantes sean para el enlace de rasgos sensoriales. Como observan Andreas Engel, Wolf Singer y sus colaboradores,<sup>170</sup> “...only strongly synchronized neuronal responses can contribute to awareness and conscious phenomenal states”. Usando un paradigma de rivalidad binocular, estos autores demostraron que bajo condiciones de rivalidad, la potencia en la banda  $\gamma$  se incrementaba para las neuronas que representan el estímulo dominante, mientras que disminuye para aquellas que responden al estímulo suprimido.

Ahora, dado que las oscilaciones  $\gamma$  pueden ocurrir de manera espontánea, otra posibilidad sugerida por Mircea Steriade y sus colegas<sup>171</sup> es que esta actividad rápida puede ser simplemente una parte de la actividad de fondo del cerebro como resultado de la despolarización de las neuronas talámicas y corticales. Pero como hacen notar Alan Hobson y sus colaboradores,<sup>172</sup> esta sugerencia debe contender con el hecho de que aunque las oscilaciones rápidas ocurran de forma espontánea, sólo se sincronizan fuertemente durante la atención focalizada y tras la presentación de estímulos relevantes para el organismo.

Otro problema con la HCT es que los investigadores parecen haber generalizado el papel de las oscilaciones  $\gamma$  haciéndolas el mecanismo que hace posible el enlace. No obstante, hay evidencia de que estas oscilaciones también se presentan en los sistemas nerviosos de otras especies relativamente inferiores a los primates, como los insectos, y sin embargo no parecen servir para enlazar rasgos sensoriales en perceptos unitarios. Así por ejemplo, en una investigación alemana se registraron oscilaciones  $\gamma$  en los lóbulos ópticos de la mosca *calliphora*. Dadas las diferencias anatomofisiológicas del sistema visual de las moscas y de los vertebrados, cabe la posibilidad de que las oscilaciones  $\gamma$  no tengan nada que ver con la compleja función de enlace con la que se les ha asociado. Así, las neuronas que están oscilando

---

<sup>169</sup> Bogen 1997.

<sup>170</sup> Engel *et al.* 1999, p. 141.

<sup>171</sup> Steriade y Amzica 1996; Steriade, Amzica y Contreras 1996.

<sup>172</sup> Kahn, Pace-Schott y Hobson 1997.

a 40 Hz en el lóbulo óptico de la mosca proporcionan una representación retinotópica del ambiente, pero no hay ninguna representación separada de los rasgos de los objetos como movimiento o color. Además, dado que en estos insectos las oscilaciones son sincrónicas en las regiones del cerebro que corresponden a grandes porciones del campo visual, no tienen esencialmente ninguna selectividad particular (e.g., a los ángulos), por consiguiente no proporcionan ninguna información acerca de la imagen en la retina. Por otro lado, las oscilaciones no siempre ocurren. Los parámetros críticos que determinan su ocurrencia incluyen el tamaño del área del ojo estimulada, la distribución del estímulo sobre el ojo, la intensidad del estímulo y el estado de adaptación del ojo. Por lo tanto, en el sistema visual de estos artrópodos no parece haber ningún problema del enlace y como bien señala Kirschfeld: “nor is there any indication that these oscillations could define ‘neuronal assemblies,’ as discussed in the context with  $\gamma$ -waves, or have anything to do with ‘awareness’ or ‘mind’”.<sup>173</sup>

Entonces, si las oscilaciones  $\gamma$  no son el mecanismo directo responsable del enlace y la conciencia, debe haber algún otro mecanismo que no requiera necesariamente las oscilaciones neuronales coherentes. Si esta idea es correcta, entonces la coherencia cuántica que subyace a las oscilaciones (según el modelo de Penrose y Hameroff) no juega un papel relevante en el surgimiento de la conciencia.

Una conocida propuesta que no hace uso de las oscilaciones neuronales es la de la psicóloga Anne Treisman y sus colaboradores.<sup>174</sup> En diversos estudios psicofísicos, Treisman ha mostrado que el enlace de rasgos sensoriales requiere la atención focalizada de los elementos en el campo visual. Su propuesta comienza intentando resolver uno de los problemas planteados por los psicólogos gestaltistas, a saber, ¿cómo se enfoca la atención en un objeto del campo visual? ¿Qué rasgos del objeto hacen que éste sobresalga del fondo? Treisman encontró que propiedades elementales tales como el brillo, color y orientación de las líneas crean fronteras visuales distintivas. Por ejemplo, un área rectangular compuesta de un patrón de letras X crea una frontera distintiva que le permite sobresalir de otro patrón formado por letras L. En contraste, un área rectangular compuesto por letras T sería difícil de distinguir del patrón de letras L, debido a que la forma de estas letras es muy parecido. En experimentos de este tipo, el tiempo que se requiere para hallar un ítem específico se incrementa con el número de ítems únicos en una escena visual.

---

<sup>173</sup> Kirschfeld 1992, p. 4766.

<sup>174</sup> Treisman y Gelade 1980; Treisman y Gormican 1988; Treisman y Sato 1990; Treisman 1988, 1998.

Con estas observaciones, Treisman sugirió que hay dos procesos secuenciales distintos involucrados en la percepción visual. Un proceso preatentivo está implicado solamente en la detección de los objetos. Este proceso escanea rápidamente la textura o rasgos globales del objeto y se enfoca en la distinción entre figura y fondo codificando en paralelo las propiedades elementales útiles de la escena: color, orientación, tamaño o dirección del movimiento. En este punto la variación en una propiedad puede ser discernida como un borde o contorno, pero no son detectadas las diferencias complejas en las combinaciones de propiedades. El procesamiento preatentivo también se denomina proceso de abajo-arriba [*bottom-up*], ya que está enfocado en las propiedades de los elementos individuales en la escena y enfatiza el agrupamiento de los ítems en la percepción visual que se requieren para distinguirlo la figura del fondo.

Este agrupamiento inicial de los ítems es seguido por un proceso atento que selecciona y hace sobresalir los rasgos todavía segregados del objeto. En contraste con el procesamiento en paralelo del sistema preatentivo, el sistema atento procesa de manera serial. Este sistema atento es un procesamiento de arriba-abajo [*top-down*] porque lo que se selecciona debe ser identificado independientemente de los elementos individuales de la escena.

Treisman propone además que las diferentes propiedades son codificadas en diferentes mapas de rasgos en distintas regiones cerebrales. Para resolver el problema del enlace, Treisman postula que hay un mapa maestro que codifica las conjunciones de rasgos de la imagen. Este mapa maestro recibe entrada de todos los mapas de rasgos, pero retiene sólo aquellos rasgos que distinguen al objeto del foco de atención de su fondo. Una vez que los rasgos sobresalientes han sido representados en el mapa maestro, la información detallada asociada a cada rasgo puede ser recuperada retrorrefiriendo a los mapas de rasgos individuales. De este modo, el mapa maestro puede combinar los detalles de los mapas de rasgos que son esenciales para el reconocimiento, y Treisman considera que la atención es el pegamento que enlaza los rasgos.

### **3.4. LA CONCIENCIA Y LA ANESTESIA GENERAL**

La evidencia más fuerte que tienen Penrose y Hameroff de que la conciencia depende de efectos cuánticos en los microtúbulos es que los anestésicos generales interrumpen de alguna manera las fuerzas London de interacción en los bolsillos hidrofóbicos. La superposición cuántica requiere la movilidad de los electrones —una pareja de electrones debe ser

relativamente libre para pasar de una órbita permitida a otra—. De acuerdo con Hameroff y sus colegas,<sup>175</sup> los anestésicos generales retardan la movilidad de los electrones. Formando sus propias atracciones de fuerza London en los bolsillos hidrofóbicos, los anestésicos pueden inhibir la movilidad de los electrones requerida para la dinámica proteica, la superposición cuántica y la conciencia. Algunas drogas alucinógenas también parecen actuar en los bolsillos hidrofóbicos vía receptores de serotonina.

De acuerdo con Hameroff y sus colaboradores, si esta evidencia se toma en dependencia con la regulación conformacional proteica sobre las fuerzas London, se pueden obtener dos conclusiones fundamentales: (i) que la conciencia depende de procesos cuánticos en los bolsillos hidrofóbicos y (ii) que estos procesos cuánticos son inhibidos por los anestésicos que impiden la movilidad de los electrones en las fuerzas London. Estos mismos procesos son incrementados (e.g., las alucinaciones) en presencia de drogas psicodélicas.

Esta hipótesis tiene dos problemas. En primer lugar, como ya lo ha señalado en repetidas ocasiones la filósofa de San Diego Patricia Churchland<sup>176</sup> al revisar el modelo de Penrose y Hameroff, no hay evidencia directa de que la pérdida de la conciencia durante la anestesia general dependa de los cambios en los MTs. Por el contrario, la evidencia contemporánea apunta a las proteínas en la membrana de las células nerviosas como el sitio principal de acción de los anestésicos generales en concentraciones quirúrgicas.<sup>177</sup>

Según algunos investigadores de entre los posibles receptores que pueden ser blanco de los anestésicos generales, la proteína receptora GABA<sub>A</sub> (ácido  $\gamma$ -aminobutírico) puede ser uno de los sitios principales de acción de los anestésicos generales.<sup>178</sup> Este receptor es el principal neurotransmisor inhibitor del cerebro y los anestésicos generales que lo potencian incluyen los agentes inhalantes como el halotano, el enflurano y el isoflurano, así como anestésicos intravenosos como el pentobarbital y el propofol. Otros receptores que también son blanco de los anestésicos son el NMDA,<sup>179</sup> el cual puede ser inhibido por la ketamina y el óxido nítrico y la Acetilcolina<sup>180</sup> que puede ser bloqueada por los anestésicos volátiles y los intravenosos.

---

<sup>175</sup> Hameroff 1998a; Hameroff et al. 2002.

<sup>176</sup> Churchland 1998, p. 121, 2000, pp. 195-197; también en Grush y Churchland, pp. 202, 203.

<sup>177</sup> Véase Franks y Lieb 1998, 2004.

<sup>178</sup> Véase e.g., John y Prichep 2005; Rudolph y Antkowiak 2004; Villars, Kanusky y Dougherty 2004.

<sup>179</sup> Flohr, Glade y Motzko 1998.

<sup>180</sup> Flood 2002; Perry *et al.* 1999.

El segundo problema es que aún siendo cierto que durante la anestesia general la conciencia se ve alterada temporalmente, también es cierto que prácticamente el resto de las funciones cognoscitivas (percepción, atención, memoria, pensamiento, lenguaje, etc.) también se ve interrumpido durante la anestesia general o durante estados transitorios provocados por las drogas alucinógenas. El problema para Penrose y Hameroff es que en el modelo no queda claro qué especificidad deben tener tanto los procesos como las estructuras que el modelo requiere, para interrumpir específicamente la conciencia. Esto es, si hubiera una especialización particular en los procesos o estructuras, sólo una o algunas funciones cognoscitivas deberían verse afectadas durante la anestesia, pero no el conjunto de todas ellas, como de hecho sucede. Así entonces, si los procesos cuánticos en las estructuras microtubulares (e.g., en los bolsillos hidrofóbicos o en las tubulinas) son responsables del surgimiento de los sucesos conscientes, y estos a su vez se pueden interrumpir con anestésicos generales afectando a la conciencia, ¿por qué razón también se ven afectadas las demás funciones cognoscitivas como el lenguaje, la percepción y el pensamiento?

## Conclusiones

---

A pesar de que la conciencia ha sido un tema recurrente en la historia de la ciencia y la filosofía, lo cierto es que hasta hace muy poco ha vuelto a ser un problema central para la investigación científica. Los modelos que intentan dar cuenta de este fenómeno son muy variados y podría haber tantos como investigadores que los desarrollan. La llamada ‘ciencia de la conciencia’ es un campo de estudio nuevo y aún queda una serie de problemas por resolver con respecto a la conciencia. El modelo de Penrose y Hameroff es un intento novedoso por resolver este misterio, pero parece añadir más dificultades que las que intenta resolver. Lo más notable quizá sea la idea de conectar la conciencia con una versión de la física cuántica que aún está por ser desarrollada y con la que la mayoría de los físicos no concuerda del todo.

El filósofo David Chalmers<sup>181</sup> sugirió distinguir entre los problemas fáciles y el problema duro de la conciencia. Los problemas fáciles son susceptibles de estudio con los métodos estándar de la ciencia cognoscitiva, ya sea en términos computacionales o neuronales, e incluyen algunos fenómenos como: la capacidad para discriminar, categorizar y reaccionar a los estímulos ambientales, la integración de la información, la habilidad para reportar los estados mentales, el acceso a los estados internos, la atención, el control deliberado de la conducta y la diferencia entre el sueño y la vigilia. El problema verdaderamente difícil de la conciencia, según Chalmers, es el problema de los *qualia* o la experiencia *à la* Nagel<sup>182</sup> (i.e., de que un organismo es consciente si hay algo que se siente ser ese organismo).

Ahora, ¿resuelve el modelo de Penrose y Hameroff el problema duro de la conciencia? No, dice Chalmers. El atractivo de los modelos cuánticos de la conciencia deriva —como bien señala el filósofo australiano— de una “Ley de Minimización del Misterio: la conciencia es un misterio y la mecánica cuántica es un misterio, por lo tanto los dos misterios tienen una fuente común”.<sup>183</sup> El modelo de Penrose y Hameroff parece apuntar a una solución al problema de la conciencia *qua* experiencia. Por ejemplo, basado en el marco del espacio-tiempo propuesto primero por Penrose, llamado redes cuánticas de espín, Hameroff sugiere que no sólo los objetos físicos y geométricos, sino también sucesos discretos de experiencia (u ocasiones de

---

<sup>181</sup> Chalmers 1995, 1996.

<sup>182</sup> Nagel 1974.

<sup>183</sup> Chalmers 1997, p. 17.

experiencia, en el sentido de Whitehead), se pueden implementar en este marco y cada suceso discreto de experiencia es asociado con un evento de reducción objetiva.

A pesar de lo novedoso y ambicioso de esta sugerencia, Penrose y Hameroff se concentran casi completamente en dar cuenta de cómo la reducción objetiva puede operar en los microtúbulos y dejan de lado la explicación de la experiencia como tal. De acuerdo con Chalmers los fenómenos cuánticos pueden tener algunas notables propiedades funcionales como el no determinismo y la no localidad. Por lo tanto resulta natural especular que estas propiedades puedan jugar algún papel en la explicación de las funciones cognitivas como la capacidad de elección deliberada o la integración de información, y estas hipótesis no deberían ser eliminadas *a priori*. Sin embargo, al momento de explicar la conciencia *qua* experiencia, los procesos cuánticos parecen no ser adecuados, ya que se deja de lado el problema de cómo es que estos procesos dan lugar a la experiencia consciente.

## Referencias

---

- ALBERTS, B., JOHNSON, A., LEWIS, J., RAFF, M., ROBERTS, K. y WALTER, P. 2002. *Molecular biology of the cell*, 4a. ed. Nueva York: Garland Publishing.
- ALONSO, A. DEL C., GRUNDKE-IQBAL, I., BARRA, H. S. e IQBAL, K. 1997. "Abnormal phosphorylation of tau and the mechanism of Alzheimer neurofibrillary degeneration: sequestration of microtubule-associated proteins 1 and 2 and the disassembly of microtubules by the abnormal tau". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94: 298-303.
- ALONSO, E. 2001. "Mentalismo, mecanicismo: el nuevo argumento de Penrose". *Revista de Filosofía* 26: 139-164.
- ANDERSON, A. R., ed. 1964. *Minds and machines*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- ARKANI-HAMED, N., DIMOPOULOS, S. y DVALI, G. 2002. "The universe's unseen dimensions". *Scientific American Special* 12(2): 66-73.
- ARNTZ, W., CHASSE, B. [productores/directores] y VICENTE, M. [director]. 2005. *What the bleep do we know?* [DVD]. EE. UU.: Captured Light Distribution / Lord of the Wind Films.
- ATMANSPACHER, H. 2004. "Quantum theory and consciousness: an overview with selected examples". *Discrete Dynamics in Nature and Society* 1: 51-73.
- BAARS, B. J., BANKS, W. P. Y NEWMAN, J. B., eds. 2003. *Essential sources in the scientific study of consciousness*. Cambridge, MA: MIT Press.
- BARR, M. 1990. "The emperor's new mind". *The American Mathematical Monthly* 97: 938-942.
- BECK, F. y ECCLES, J. C. 1992. "Quantum aspects of brain activity and the role of consciousness". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89: 11357-11361.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_\_. 2003. "Quantum processes in the brain: a scientific basis of consciousness". En Osaka 2003, pp. 141-165.
- BENIOFF, P. 1982. "Quantum mechanical models of Turing machines that dissipate no energy". *Physical Review Letters* 48: 1581-1585.
- BLACKMORE, S. 2004. *Consciousness: an introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- BLAKEMORE, C. y GREENFIELD, S., eds. 1987. *Mindwaves: thoughts on intelligence, identity and consciousness*. Oxford: Basil Blackwell.
- BLANK, C. 2000. "Penrose y la inteligencia artificial". *Episteme NS* 20: 29-49.
- BLOCK, N. 1980a. "Troubles with functionalism". En Block 1980, pp. 268-305.
- \_\_\_\_ 1980b. "What is functionalism". En Block 1980, pp. 171-184. (Reimpreso en Heil 2004, pp. 183-199).
- \_\_\_\_ 1996. "How can we find the neural correlate of consciousness?" *Trends in Neurosciences* 19: 456-459.
- \_\_\_\_ y FODOR, J. A. 1972. "What psychological states are not". *The Philosophical Review* 81: 159-181.
- \_\_\_\_, ed. 1980. *Readings in philosophy of psychology, vol. 1*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- \_\_\_\_, FLANAGAN, O. y GÜZELDERE, G., eds. 1997. *The nature of consciousness: philosophical debates*. Cambridge, MA: MIT Press.
- BOGEN, J. E. 1997. "Some neurophysiologic aspects of consciousness". *Seminars in Neurobiology* 7: 95-103.
- BRINGSJORD, S. y XIAO, H. 2000. "A refutation of Penrose's Gödelian case against artificial intelligence". *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 12: 307-329.
- BROWN, J. A. y TUSZYŃSKI, J. A. 1997. "Dipole interactions in axonal microtubules as a mechanism of signal propagation". *Physical Review E* 56: 5834-5840.

- CALLENDER C. y HUGGETT, N., eds. 2001. *Physics meets philosophy at the Planck scale: Contemporary theories in quantum gravity*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- CARMINATI, J. L. y STEARNS, T. 1997. "Microtubules orient the mitotic spindle in yeast through dynein-dependent interactions with the cell cortex". *The Journal of Cell Biology* 138: 629-641.
- CARTER, R. 2002. *Exploring consciousness*. Berkeley, CA: University of California Press.
- CERF, F., EL AMRI, M, EL OUASDAD, E. H. y HIRSCH, E. 1999. "Non-linear analysis of epileptic I. Correlation-dimension measurements for absence epilepsy and near-periodic signals". *Biological Cybernetics* 80: 247-258.
- CHALMERS, D. J. 1995. "Facing up to the problem of consciousness". *Journal of Consciousness Studies* 2: 200-219. (Reimpreso en Shear 1997, pp. 9-30 y en Heil 2005, pp. 617-640).
- \_\_\_\_\_. 1996. *The conscious mind: in search of a fundamental theory*. Nueva York: Oxford University Press.
- \_\_\_\_\_. 1998. "On the search for the neural correlate of consciousness". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1998, pp. 219-229.
- \_\_\_\_\_. 2000. "What is a neural correlate of consciousness". En Metzinger 2000, pp. 17-39.
- CHEN, J., KANAI, Y., COWAN, N. J. y HIROKAWA, N. 1992. "Projection domains of MAP2 and tau determine spacings between microtubules in dendrites and axons". *Nature* 360: 374-677.
- CHURCHLAND, P. M. 1988. *Matter and consciousness: a contemporary introduction to the philosophy of mind*, ed. rev. Cambridge, MA: MIT Press.
- CHURCHLAND, P. S. 1998. "Brainshy: nonneural theories of conscious experience". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1998, pp. 109-124.
- \_\_\_\_\_. 2002. *Brain-wise: studies in neurophilosophy*. Cambridge, MA: MIT Press.
- CLARK, A. 1990. "The stuff of consciousness". *The Philosophical Quarterly* 40: 509-514.
- CLEEREMANS, A. 2005. "Computational correlates of consciousness". En Laureys 2005, pp. 81-98.
- CLEGG, J. S. 1979. "Metabolism and the intracellular environment-vicinal water network model". En W. Drost-Hansen y J. S. Clegg, eds., *Cell-associated water*, pp. 363-413. Nueva York: Academic Press.
- \_\_\_\_\_. 1983. "Intracellular water, metabolism and cell architecture". En H. Fröhlich y F. Kremer, eds., *Coherent excitations in biological systems*, pp. 162-175. Berlín: Springer-Verlag.
- COLLADO CORONA, M. A., SHKUROVICH ZASLAVSKY, M. y REYES BÁEZ, B. 1997. "Electroencefalografía en epilepsia". En A. Feria Velasco, D. Martínez de Muñoz y F. Rubio Donnadiou, eds., *Epilepsia: aspectos neurobiológicos, médicos y sociales*, pp. 256-276. México: Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía.
- CONRAD, M. 1996. "Percolation and collapse of quantum parallelism: a model of qualia and choice". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, pp. 469-492.
- COTILLON-WILLIAMS, N. y EDELINE, J.-M. 2003. "Evoked oscillations in the thalamo-cortical auditory system are present in anesthetized but not in unanesthetized rats". *Journal of Neurophysiology* 89: 1968-1984.
- CRICK, F. y KOCH, C. 1990. "Towards a neurobiological theory of consciousness". *Seminars in the Neurosciences* 2: 263-275.
- \_\_\_\_\_. y \_\_\_\_\_. 1995. "Are we aware of neural activity in primary visual cortex?" *Nature* 375: 121-123.
- DAFILIS, M. P., LILEY, D. T. J. y CADUSCH, P. J. 2001. "Robust chaos in a model of the electroencephalogram: Implications for brain dynamics". *Chaos*, 11, 474-478.
- DE MORAIS RIBEIRO, H. 2001. "Uma revisão da teoria de consciência de Penrose-Hameroff". *Informação e Cognição* 3(3): <http://www.marilia.unesp.br/atividades/extensao/revista/v3/artigo5.html>
- DELONG, M. R. 2000. "The basal ganglia". En Kandel, Schwartz y Jessell 2000, pp. 853-867.
- DESAI, A. y MITCHISON, T. J. 1997. "Microtubule polymerization dynamics". *Annual Review of Cell Division Biology* 13: 83-117.

- DEUTSCH, D. 1985. "Quantum theory: the Church-Turing principle and the universal quantum computer". *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences* 400: 97-117.
- \_\_\_\_ y JOZSA, R. 1992. "Rapid solutions of problems by quantum computation". *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences* 439: 553-558.
- DEWITT, B. S. 1973. "The many-universes interpretation of quantum mechanics". En B. S. DeWitt y N. Graham, eds., *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*, pp. 167-218. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- DÍAZ, J. L. y VILLANUEVA, E., comps. 1996. *Mente cuerpo*. México: Coordinación de Humanidades / Centro de Neurobiología, UNAM.
- DIVINCENZO, D. P. 1995. "Quantum computation". *Science* 270: 255-261.
- DUFF, M. J. 2003. "The theory formerly known as strings". *Scientific American Special* 13(1): 12-17.
- ECCLES, J. C. 1986. "Do mental events cause neural events analogously to the probability fields of quantum mechanics?" *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 227: 411-428.
- \_\_\_\_ 1990. "A unitary hypothesis of mind-brain interaction in the cerebral cortex". *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 240: 433-451.
- \_\_\_\_ 1994. *How the self controls its brain*. Berlín: Springer-Verlag.
- ECKHORN, R., BAUER, R., JORDAN, W., BROSCHE, M., KRUSE, W., MUNK, M. y REITBOECK, H. J. 1988. "Coherent oscillations: a mechanism for feature linking in the visual cortex?" *Biological Cybernetics* 60: 121-130.
- EDELMAN, G. M. y TONONI, G. 2000. *A universe of consciousness: how matter becomes imagination*. Nueva York: Basic Books.
- EGILE, C., LECHLER, T. y LI, R. 2001. "Beyond a "skeleton": understanding cellular functions of the cytoskeleton". *Genome Biology* 2: 4005.1-4005.3.
- ELITZUR, A. C. 1996. "Time and consciousness: the uneasy bearing of relativity theory on the mind-body problem". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, pp. 543-550.
- ENGEL, A. K., FRIES, P., KÖNIG, P., BRECHT, M. y SINGER, W. 1999. "Temporal binding, binocular rivalry, and consciousness". *Consciousness and Cognition* 8: 128-151. (Reimpreso en Baars, Banks y Newman 2003, pp. 125-146).
- ESCOTTO CÓRDOVA, E. A. 1999. *Introducción a la electroencefalografía y trazos característicos de los síndromes epilépticos*. México: FES Zaragoza, UNAM.
- ESCOTTO-CÓRDOVA, A. y GRANDE-GARCÍA, I. 2005. "Vicisitudes históricas en el estudio de la conciencia". En A. Escotto-Córdova e I. Grande-García, eds. *Enfoques en el estudio de la conciencia*, pp. 1-156. México: FES Zaragoza, UNAM.
- EVERETT, H. III. 1957. "'Relative state' formulation of quantum mechanics". *Reviews of Modern Physics* 29: 454-462.
- EZCURDIA, M. y HANSBERG, O., comps. 2003. *La naturaleza de la experiencia, vol. 1: sensaciones*. México: Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM.
- FELL, J., FERNÁNDEZ, G. y ELGER, C. E. 2003. "More than synchrony: EEG chaoticity may be necessary for conscious brain functioning". *Medical Hypotheses* 61: 158-160.
- FERNÁNDEZ-GUARDIOLA, A. 1979. *La conciencia: el problema mente-cerebro*. México: Trillas.
- FEYNMAN, R. P. 1986. "Quantum mechanical computers". *Foundations of Physics* 16: 507-531.
- FLOHR, H., GLADE, U. y MOTZKO, D. 1998. "The role of the NMDA synapse in general anesthesia". *Toxicology Letters* 100-101: 23-29.
- FLOOD, P. 2002. "General anesthetics". En E. Perry, H. Ashton y A. Young, eds. *Neurochemistry of consciousness: neurotransmitters in mind*, pp. 149-162. Philadelphia: John Benjamins.

- FRANKS, N. P. y LIEB, W. R. 1998. "The molecular basis of general anesthesia: current ideas". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1998, pp. 443-457.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_ 2004. "Seeing the light: protein theories of general anesthesia". *Anesthesiology* 101: 235-237.
- FREEMAN, W. J. 1995. *Societies of brain: a study in the neuroscience of love and hate*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- FRITH, C., PERRY, R. y LUMER, E. 1999. "The neural correlates of conscious experience: an experimental framework". *Trends in Cognitive Sciences* 3: 105-114.
- FRÖHLICH, H. 1975. "The extraordinary dielectric properties of biological materials and the action of enzymes". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 72: 4211-4215.
- GHIRARDI, G. C., RIMINI, A. y WEBER, T. 1986. "Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems". *Physical Review D* 34: 470.
- GILLIAM, T. C., KANDEL, E. R. y JESSELL, T. M. 2000. "Genes and behavior". En Kandel, Schwartz y Jessell 2000, pp. 36-62.
- GODFROID, I. O. 2003. "Psihiagenia: a gauge theory for the mind-brain problem". *NeuroQuantology* 2: 189-199.
- GOEDERT, M. 2003. "Relevance of mutations in tau for understanding the tauopathies". *Current Medicine and Chemistry — Immunology, Endocrinology & Metabolic Agents* 3: 341-348.
- GOSWAMI, A. 1993. *The self-aware universe: how consciousness creates the material world*. Nueva York: Jeremy P. Tarcher/Putnam.
- \_\_\_\_ 2001. *Physics of the soul: the quantum book of living, dying, reincarnation, and immortality*. Charlottesville, VA: Hampton Roads Publishing Co.
- GRANDE GARCÍA, I. 2001. *La conciencia, el problema mente-materia y el problema mente-cerebro, a través de la historia y el estado actual de la filosofía, la psicología y las neurociencias*, tesis de licenciatura en psicología. México: FES-Zaragoza, UNAM.
- GRASSBERGER, P. y PROCACCIA, I. 1983. "Characterisation of strange attractors". *Physical Review Letters* 50, 346-349.
- GRAY, C. M. y DI PRISCO, G. V. 1997. "Stimulus-dependent neuronal oscillations and local synchronization in striate cortex of the alert cat". *The Journal of Neuroscience* 17: 3239-3253.
- \_\_\_\_, KÖNIG, P., ENGEL, A. K. y SINGER, W. 1989. "Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties". *Nature* 338: 334-337.
- GRAY, J. 1992. "Consciousness on the scientific agenda". *Nature* 358: 277.
- GREENE, B. [conductor] y MCMASTER, J. [productor/director]. 2003. *The elegant universe: superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory* [DVD]. EE. UU.: NOVA / WGBH Boston.
- \_\_\_\_ 1999. *The elegant universe: superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory*. Nueva York: W. W. Norton & Co.
- GRUNDLER, W. y KEILMANN, F. 1983. "Sharp resonances in yeast growth prove nonthermal sensitivity to microwaves". *Physical Review Letters* 51, 1214-1216.
- GRUPO DE COMPUTACIÓN CUÁNTICA. 2003. *Introducción al modelo cuántico de computación*, reporte técnico No. 19, Escuela U. y Facultad Informática, Universidad Politécnica Madrid: <http://www.dma.eui.upm.es/seminarios/CompCuant>
- GRUSH, R. y CHURCHLAND, P. S. 1995. "Gaps in Penrose's toilings". En T. Metzinger, ed., *Conscious experience*, pp. 185-211. Exeter, Reino Unido: Imprint Academic.
- GU, F., MENG, X., SHEN, E. y CAI, Z. 2003. "Can we measure consciousness with EEG complexities?" *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 13, 733-742.
- HALDANE, J. B. S. 1934. "Quantum mechanics as a basis for philosophy". *Philosophy of Science* 1: 78-98.

- HAMEROFF, S. R. 1987. *Ultimate computing: biomolecular consciousness and nanotechnology*. Amsterdam: Elsevier Science.
- \_\_\_\_ 1998a. "Anesthesia, consciousness and hydrophobic pockets—a unitary quantum hypothesis of anesthetic action". *Toxicology Letters* 100-101: 31-39.
- \_\_\_\_ 1998b. "Did consciousness cause the Cambrian evolutionary explosion?" En Hameroff, Kaszniak y Scott 1998, pp. 421-437.
- \_\_\_\_ 1998c. "Fundamental geometry: the Penrose-Hameroff "Orch OR" model of consciousness". En S. A. Huggett, ed., *The geometric universe: science, geometry, and the work of Roger Penrose*, pp. 135-160. Oxford: Oxford University Press.
- \_\_\_\_ 1998d. "Fundamentality: is the conscious mind subtly linked to a basic level of the universe?" *Trends in Cognitive Sciences* 2: 119-124.
- \_\_\_\_ 1998e. "More neural than thou". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1998, pp. 197-213.
- \_\_\_\_ 1998f. "Quantum computation in brain microtubules? The Penrose-Hameroff "Orch OR" model of consciousness". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* 356: 1869-1896.
- \_\_\_\_ 1998g. "Reply to Spier and Thomas from Stuart Hameroff". *Trends in Cognitive Sciences* 2: 125-126.
- \_\_\_\_ 2001a. Biological feasibility of quantum approaches to consciousness: the Penrose-Hameroff 'Orch OR' model. En van Loocke 2001, pp. 1-61.
- \_\_\_\_ 2001b. "Consciousness, the brain, and spacetime geometry". *Annals of the New York Academy of Sciences* 929: 74-104. (Reimpreso en Marijuán 2001, pp. 74-104).
- \_\_\_\_, Nip, A., Porter, M. y Tuszyński, J. 2002. "Conduction pathways in microtubules, biological quantum computation, and consciousness". *BioSystems* 64: 149-168.
- \_\_\_\_ y Penrose, R. 1995. "Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: a model for consciousness". En King y Pribram 1995, pp. 241-274.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_ 1996a. "Conscious events as orchestrated space-time selections". *Journal of Consciousness Studies* 3: 36-53.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_ 1996b. "Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: a model for consciousness". *Mathematics and Computers in Simulation* 40: 453-480.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_ 1996c. "Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: a model for consciousness". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, pp. 507-540.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_ 1997. "Conscious events as orchestrated space-time selections". En Shear 1997, pp. 177-195.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_ 2000. "Quantum theory and human consciousness". En F. Fukuyama y C. S. Wagner, eds., *Information and biological revolutions: global governance challenges—summary of a study group*, pp. 47-62. Nueva York: RAND.
- \_\_\_\_ y \_\_\_\_ 2003. "Conscious events as orchestrated space-time selections". *NeuroQuantology* 1(1): 10-35.
- \_\_\_\_ y Watt, R. C. 1982. "Information processing in microtubules". *Journal of Theoretical Biology* 98: 549-561.
- \_\_\_\_ y Woolf, N. J. 2003. "Quantum consciousness: a cortical neural circuit". En Osaka 2003, pp. 167-200.
- \_\_\_\_, Kaszniak, A. W. y Chalmers, D. J., eds. 1999. *Toward a science of consciousness III: the third Tucson discussions and debates*. Cambridge, MA: MIT Press.
- \_\_\_\_, \_\_\_\_ y Scott, A. C., eds. 1996. *Toward a science of consciousness: The first Tucson discussions and debates*. Cambridge, MA: MIT Press.

- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_ y \_\_\_\_\_, eds. 1998. *Toward a science of consciousness II: the second Tucson discussions and debates*. Cambridge, MA: MIT Press.
- HARDCASTLE, V. G. 1998. "The binding problem". En W. Bechtel y G. Graham, eds., *A companion to cognitive science*, pp. 555-565. Cambridge, MA: MIT Press.
- HAWKING, S. y PENROSE, R. 1970. "The singularities of gravitational collapse and cosmology". *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 314: 529-548.
- HAYASHI, I. e IKURA, M. 2003. "Crystal structure of the amino-terminal microtubule-binding domain of end-binding protein 1 (EB1)". *The Journal of Biological Chemistry* 278: 36430-36434.
- HEIL, J., ed. 2004. *Philosophy of mind: a guide and anthology*. Oxford: Oxford University Press.
- HOWARD, J. y HYMAN, A. A. 2003. "Dynamics and mechanics of the microtubule plus end". *Nature* 422: 753-758.
- HUMMEL, J. 1999. "Binding problem". En Wilson y Keil 1999, pp. 85-86.
- JIBU, M., HAGAN, S., HAMEROFF, S. R., PRIBRAM, K. H. y YASUE, K. 1994. "Quantum optical coherence in cytoskeletal microtubules: implications for brain function". *BioSystems* 32: 195-209.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_ y Yasue, K. 1996. "Subcellular quantum optical coherence: implications for consciousness". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, pp. 493-505.
- JOHN, E. R. y PRICHEP, L. S. 2005. "The anesthetic cascade: a theory of how anesthesia suppresses consciousness". *Anesthesiology* 102: 447-471.
- JOHNSON, G. V. W. y HARTIGAN, J. A. 1999. "Tau protein in normal and Alzheimer's disease brain: an update". *Journal of Alzheimer's Disease* 1: 329-351.
- KAHN, D., PACE-SCHOTT, E. F. y HOBSON, J. A. 1997. "Consciousness in waking and dreaming: the roles of neuronal oscillation and neuromodulation in determining similarities and differences". *Neuroscience* 78: 13-38.
- KANDEL, E. R., SCHWARTZ, J. H. y JESSELL, T. M., eds., *Principles of neural science*, 4a. ed. Nueva York: McGraw-Hill.
- \_\_\_\_\_, y SIEGELBAUM, S. A. 2000. "Overview of synaptic transmission". En Kandel, Schwartz y Jessell 2000, pp. 175-186.
- KÁROLYHÁZY, F., FRENKEL, A. y LUKÁCS, B. 1986. "On the possible role of gravity on the reduction of the wave function". En R. Penrose y C. J. Isham, eds., *Quantum concepts in space and time*, pp. 109-128. Oxford: Oxford University Press.
- KIM, J. 1993. "Multiple realization and the metaphysics of reduction". En J. Kim, *Supervenience and mind: selected philosophical essays*, pp. 309-335. Nueva York: Cambridge University Press.
- KING, C. 1996. "Fractal neurodynamics and quantum chaos: resolving the mind-brain paradox through novel biophysics". En E. Mac Cormac y M. I. Stamenov, eds., *Fractals of brain, fractals of mind: in search of a symmetry bond*, pp. 179-233. Philadelphia, PA: John Benjamin.
- \_\_\_\_\_. 2003. "Chaos, quantum-transactions and consciousness: a biophysical model intentional mind". *NeuroQuantology* 1: 129-162.
- KING, J. y PRIBRAM, K. H., eds. 1995. *Scale in conscious experience: is the brain too important to be left to specialists to study?* Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- KIRSCHFELD, K. 1992. "Oscillations in the insect brain: do they correspond to the cortical  $\gamma$ -waves of vertebrates?" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89: 4764-4768.
- KLEIN, S. A. 1999. "Do apparent temporal anomalies require nonclassical explanation?" En Hameroff, Kaszniak y Chalmers 1999, pp. 343-357.
- LAUREYS, S., ed. 2005. *The boundaries of consciousness: neurobiology and neuropathology (Progress in brain research, vol. 150)*. Amsterdam: Elsevier Science.

- LE VAN QUYEN, M., MARTINERIE, J., BAULAC, M. y VARELA, F. 1999. "Anticipating epileptic seizures in real time by a non-linear analysis of similarity between EEG recordings". *NeuroReport* 10: 2149-2155.
- LEWIS, D. K. 1966. "An argument for the identity theory". *The Journal of Philosophy* 63: 17-25. (Reimpreso en Heil 2004, pp. 150-157).
- LIBET, B. 2003. "Cerebral physiology of conscious experience: experimental studies in human subjects". En Osaka 2003, pp. 57-84.
- \_\_\_\_\_. 2004. *Mind time: the temporal factor in consciousness*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- LINDSTRÖM, P. 2001. "Penrose's new argument". *Journal of Philosophical Logic* 30: 241-250.
- LUCAS, J. R. 1961. "Minds, machines and Gödel". *Philosophy* 36: 112-127. (Reimpreso en Anderson 1964, pp. 43-59).
- MANIOTIS, A. J., CHEN, C. S. e INGBER, D. E. 1997. "Demonstration of mechanical connections between integrins, cytoskeletal filaments, and nucleoplasm that stabilize nuclear structure". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94: 849-854.
- MARIJUÁN, P. C., ed. 2001. *Cajal and consciousness: scientific approaches to consciousness on the centennial of Ramón y Cajal's Textura*. Nueva York: The New York Academy of Sciences.
- MARKOPOULOU, F. y SMOLIN, L. 2004. "Quantum theory from quantum gravity". *Physical Review D* 70: 1240291-12402910.
- MARSHALL, I. N. 1989. "Consciousness and Bose-Einstein condensates". *New Ideas in Psychology* 7: 73-83.
- \_\_\_\_\_, Zohar, D. y Peat, F. D. 1997. *Who's afraid of Schrödinger's cat? An A-to-Z guide to all the new science ideas you need to keep up with the new thinking*. Nueva York: William Morrow.
- MARTINERIE, J., ADAM, C., LE VAN QUYEN, M., BAULAC, M., CLEMENCEAU, S., RENAULT, B. y VARELA, F. J. 1998. "Epileptic seizures can be anticipated by non-linear analysis". *Nature Medicine* 4: 1173-1176.
- MASTERS, R. D. 1990. "Can physics explain human consciousness". *The Quarterly Review of Biology* 65: 481-484.
- MATSUNO, K. 2001. "The internalist enterprise on constructing cell motility in a bottom-up manner". *BioSystems* 61: 115-124.
- MCCARTHY, J. 1998. "Review of *The emperor's new mind* by Roger Penrose". Manuscrito no publicado. Stanford, CA: Computer Science Department, Stanford University.
- MCDERMOTT, D. V. 2001. *Mind and mechanism*. Cambridge, MA: MIT Press.
- MELKI, R., CARLIER, M. F., PANTALONI, D. y TIMASHEFF, S. N. 1989. "Cold depolymerization of microtubules to double rings: geometric stabilization of assemblies". *Biochemistry* 28: 9143-9152.
- METZINGER, T., ed. 2000. *Neural correlates of consciousness: empirical and conceptual questions*. Cambridge, MA: MIT Press.
- MORARIU, V. V., COZA, A., CHIS, M. A., ISVORAN, A. y MORARIU, L.-C. 2001. "Scaling in cognition". *Fractals*, 9, 379-391.
- NAGEL, T. 1974. "What is it like to be a bat?" *The Philosophical Review* 83: 435-450.
- NEVILLE, K. R. y HABERLY, L. B. 2003. "Beta and gamma oscillations in the olfactory system of the urethane-anesthetized rat". *Journal of Neurophysiology* 90: 3921-3930.
- NIEBUR, E., HSIAO, S. S. y JOHNSON, K. O. 2002. "Synchrony: a neuronal mechanism for attentional selection?" *Current Opinion in Neurobiology* 12: 190-194.
- NIELSEN, M. A. 2002. "Rules for a complex quantum world". *Scientific American* 287(5): 48-57.
- \_\_\_\_\_. 2003. "Simple rules for a complex quantum world". *Scientific American Special* 13(1): 24-33.
- NOGALES, E. 2000. "Structural insights into microtubule function". *Annual Review of Biochemistry* 69: 277-302.

- \_\_\_\_\_. 2001. "Structural insights into microtubule function". *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure* 30: 397-420.
- O'BRIEN, G. y OPIE, J. 1999. "A connectionist theory of phenomenal experience". *Behavioral and Brain Sciences* 22: 127-148.
- OSAKA, N., ed. 2003. *Neural basis of consciousness*. Philadelphia, PA: John Benjamins.
- PANDA, D., SAMUEL, J. C., MASSIE, M., FEINSTEIN, S. C. y WILSON, L. 2003. "Differential regulation of microtubule dynamics by three- and four-repeat tau: implications for the onset of neurodegenerative disease". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100: 9548-9553.
- PASTOR-GÓMEZ, J. 2002. "Mecánica cuántica y cerebro: una revisión crítica". *Revista de Neurología* 35: 87-94.
- PAUSER, S., ZSCUNKE, A., KHUEN, A. y KELLER, K. 1995. "Estimation of water content and water mobility in the nucleus and cytoplasm of *Xenopus laevis* vortex by NMR microscopy". *Magnetic Resonance Imaging* 13: 269-276.
- PENROSE, O. y ONSAGER, L. 1956. "Bose-Einstein condensation and liquid helium". *Physical Review* 104: 576-584.
- PENROSE, R. 1971. "Angular momentum: an approach to combinatorial space-time". En E. A. Bastin, ed., *Quantum theory and beyond*, pp. 151-180. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_. 1987. "Minds, machines and mathematics". En Blakemore y Greenfield 1987, pp. 259-276.
- \_\_\_\_\_. 1989. *The emperor's new mind: concerning computers, minds, and the laws of physics*. Oxford: Oxford University Press.
- \_\_\_\_\_. 1989/1999. *The emperor's new mind: concerning computers, minds, and the laws of physics*, reimpr. Oxford: Oxford University Press.
- \_\_\_\_\_. 1990. "Précis of The emperor's new mind: concerning computers, minds, and the laws of physics". *Behavioral and Brain Sciences*, 13: 643-655.
- \_\_\_\_\_. 1994. *Shadows of the mind: a search for the missing science of consciousness*. Nueva York: Oxford University Press.
- \_\_\_\_\_. 1996. "Beyond the doubting of a shadow: a reply to commentaries on Shadows of the Mind". *Psyche: An Interdisciplinary Journal of Research on Consciousness* 2(23): <http://psyche.cs.monash.edu.au/v2/psyche-2-23-penrose.html>
- \_\_\_\_\_. 1997a. "On understanding understanding". *International Studies in the Philosophy of Science* 11: 7-20.
- \_\_\_\_\_. 1997b. *The large, the small and the human mind*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_. 1998a. "Can a computer understand?" En S. Rose, ed., *From brains to consciousness?: Essays on the new sciences of the mind*, pp. 154-179. Princeton, Nueva Jersey: Princeton University Press.
- \_\_\_\_\_. 1998b. "Quantum computation, entanglement and state reduction". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* 356: 1927-1948.
- \_\_\_\_\_. 2001. "On gravity's role in quantumstate reduction". En Callender y Huggett 2001, pp. 290-304.
- \_\_\_\_\_. 2004. *The road to reality: a complete guide to the laws of the universe*. Londres: Jonathan Cape.
- PERRY, E., WALKER, M., GRACE, J. y PERRY, R. 1999. "Acetylcholine in mind: a neurotransmitter correlate of consciousness?" *Trends in Neuroscience* 22: 273-280.
- PHILLIPS, F. 2001. "Quantum computation". *The Mathematica Journal* 8: 1-6.
- PLOURDE, G., BARIBEAU, J. y BONHOMME, V. 1997. "Katemine increases the amplitude of the 40-Hz auditory steady-state response in humans". *British Journal of Anaesthesia* 78: 524-529.

- POLLARD, T. D. 2003. "The cytoskeleton, cellular motility and the reductionist agenda". *Nature* 422: 741-745.
- PRATT, D. 2003. "Consciousness, causality, and quantum physics". *NeuroQuantology* 1: 58-67.
- PUIG, B., FERRER, I., LUDUEÑA, R. F. y ÁVILA, J. 2005. "βII-tubulin and phospho-tau aggregates in Alzheimer's disease and Pick's disease". *Journal of Alzheimer's Disease* 7: 213-220.
- PUTNAM, H. 1964. "Minds and machines". En Anderson 1964, pp. 72-97.
- \_\_\_\_\_. 1967/2004. "Psychological predicates". En Heil 2004, pp. 158-167.
- PYLYSHYN, Z. 1989. "Computing in cognitive science". En M. I. Posner, ed., *Foundations of cognitive science*, pp. 51-91. Cambridge, MA: MIT Press.
- RASMUSSEN, S., KARAMPURWALA, H., VAIDYANATH, R., JENSEN, K. S. y HAMEROFF, S. 1990. "Computational connectionism within neurons: a model of cytoskeletal automata subserving neural networks". *Physica D* 42: 428-449.
- REES, G., KREIMAN, G. y KOCH, C. 2002. "Neural correlates of consciousness in humans". *Nature Reviews Neuroscience* 3: 261-270.
- ROBINSON, W. S. 1992. "Penrose and mathematical ability". *Analysis* 52: 80-87.
- ROSSER, B. 1936. "Extensions of some theorems of Gödel and Church". *The Journal of Symbolic Logic* 1: 87-91.
- \_\_\_\_\_. 1937. "Gödel's theorems for non-constructive logics". *The Journal of Symbolic Logic* 2: 129-137.
- \_\_\_\_\_. 1939. "An informal exposition of proofs of Gödel's theorems and Church's theorem". *The Journal of Symbolic Logic* 4: 53-60.
- ROY, D. P. 1993. *A quantum measurement approach to tunneling*. Singapur: World Scientific.
- RUDOLPH, U. y ANTKOWIAK, B. 2004. "Molecular and neuronal substrates for general anaesthetics". *Nature Reviews Neuroscience* 5: 709-720.
- SÁNCHEZ, C., DÍAZ-NIDO, J. y AVILA, J. 2000. "Phosphorylation of microtubule-associated protein 2 (MAP2) and its relevance for the regulation of the neuronal cytoskeleton function". *Progress in Neurobiology* 61: 133-168.
- SATINOVER, J. 2001. *The quantum brain: the search for freedom and the next generation of man*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- SCHOLEY, J. M., ROGERS, G. C. y SHARP, D. J. 2001. "Mitosis, microtubules, and the matrix". *The Journal of Cell Biology* 154: 261-266.
- SCHRÖDINGER, E. 1935/1980. "The present situation in quantum mechanics". *Proceedings of the American Philosophical Society* 124: 323-338.
- SEARLE, J. R. 1980. "Minds, brains, and programs". *Behavioral and Brain Sciences* 3: 417-457. (Reimpreso en Heil 2004, pp. 235-252).
- \_\_\_\_\_. 1987. "Minds and brains without programs". En Blakemore y Greenfield 1987, pp. 209-233.
- \_\_\_\_\_. 1997. *The mystery of consciousness*. Nueva York: New York Review of Books.
- SHADLEN, M. N. y MOVSHON, J. A. 1999. "Synchrony unbound: a critical evaluation of the temporal binding hypothesis". *Neuron* 24: 67-77.
- SHAPIRO, S. 2003. "Mechanism, truth, and Penrose's new argument". *Journal of Philosophical Logic* 32: 19-42.
- SHEAR, ed. 1997. *Explaining consciousness: the hard problem*. Cambridge, MA: MIT Press.
- SHOEMAKER, S. 1981. "Some varieties of functionalism". *Philosophical Topics* 12: 93-120.
- SINGER, W. 1999a. "Binding by neural synchrony". En R. A. Wilson y F. C. Keil, eds., *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*, pp. 85-86. Cambridge, MA: MIT Press.
- \_\_\_\_\_. 1999b. "Neuronal synchrony: a versatile code for the definition of relations?" *Neuron* 24: 49-65.
- \_\_\_\_\_. 2001. "Consciousness and the binding problem". *Annals of the New York Academy of Sciences* 929: 123-146. (Reimpreso en Marijuán 2001, pp. 123-146).

- \_\_\_\_ y GRAY, C. M. 1995. "Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis". *Annual Review of Neuroscience* 18: 555-586. (Reimpreso en Baars, Banks y Newman 2003, pp. 1087-1111).
- SMITH, Q. y JOKIC, A., eds. 2003. *Consciousness: new philosophical perspectives*. Oxford: Oxford University Press.
- SMOLIN, L. 2004. "Atoms of space and time". *Scientific American* 290(1): 56-65.
- STAPP, H. P. 1995. "Why classical mechanics cannot naturally accommodate consciousness but quantum mechanics can". En King y Pribram 1995, pp. 277-311.
- \_\_\_\_ 1997. "The hard problem: a quantum approach". En Shear 1997, pp. 197-215.
- \_\_\_\_ 2009. *Mind, matter and quantum mechanics*, 3a ed. Berlín: Springer.
- STERIADE, M. y AMZICA, F. 1996. "Intracortical and corticothalamic coherency of fast spontaneous oscillations". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 93: 2533-2538.
- \_\_\_\_, \_\_\_\_ y Contreras, D. 1996. "Synchronization of fast (30-40 Hz) spontaneous cortical rhythms during brain activation". *Journal of Neurosciences* 16: 392-417.
- TEGMARK, M. 2000. "Importance of quantum decoherence in brain processes". *Physical Review E* 61: 4194-4206.
- \_\_\_\_ 2003. "Parallel universes". *Scientific American* 288(5): 31-41.
- TEJADA, J., GARG, A., GIDER, S., AWSCHALOM, D. D., DIVINCENZO, D. y LOSS, D. 1996. "Does macroscopic quantum coherence occur in ferritin?" *Science* 272: 424-426.
- TOLLAKSEN, J. 1996. "New insights from quantum theory on time, consciousness, and reality". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, pp. 551-567.
- TREISMAN, A. 1988. "Features and objects: the fourteenth Bartlett Memorial Lecture". *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 40: 201-237.
- \_\_\_\_ 1996. "The binding problem". *Current Opinion in Neurobiology* 6:171-178.
- \_\_\_\_ 1998. "Feature binding, attention and object perception". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 353: 1295-1306.
- \_\_\_\_ y Gelade, G. 1980. "A feature-integration theory of attention". *Cognitive Psychology* 12: 97-136.
- \_\_\_\_ y Gormican, G. 1988. "Feature analysis in early vision: evidence from search asymmetries". *Psychological Review* 95: 15-48.
- \_\_\_\_ y Sato, S. 1990. "Conjunction search revisited". *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16: 459-478.
- TUSZYŃSKI, J. A., BROWN, J. A. y HAWRYLAK, P. 1998. "Dielectric polarization, electrical conduction, information processing and quantum computation in microtubules. Are they plausible?" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* 356: 1897-1926.
- \_\_\_\_, TRPISOVÁ, B., SEPT, D. y SATARIĆ, M. V. 1996. "Microtubular self-organization and information processing capabilities". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, pp. 407-417.
- VALLEE, R. 1980. "Structure and phosphorylation of microtubule-associated protein 2 (MAP 2)". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 77: 3206-3210.
- VILLARS, P. S., KANUSKY, J. T. y DOUGHERTY, T. B. 2004. "Stunning the neural nexus: mechanisms of general anesthesia". *AANA Journal* 72: 197-205.
- VAN LOOCKE, P., ed. 2001. *The physical nature of consciousness*. Philadelphia, PA: John Benjamins.
- VON DER MALSBERG, C. 1995. "Binding in models of perception and brain function". *Current Opinion in Neurobiology* 5: 520-526.
- VON NEUMANN, J. 1955. *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- WALKER, E. H. 1970. "The nature of consciousness". *Mathematical Biosciences* 7: 131-178.

- \_\_\_\_\_. 1977. "Quantum mechanical tunneling in synaptic and ephatic transmission". *International Journal of Quantum Chemistry* 11: 103-127.
- \_\_\_\_\_. 2000. *The physics of consciousness: the quantum mind and the meaning of life*. Cambridge, MA: Perseus Books.
- \_\_\_\_\_. 2001. "The natural philosophy and physics of consciousness". En van Loocke 2001, pp. 63-82.
- WALLING, P. T. y HICKS, K. N. 2003. "Dimensions of consciousness". *BUMC Proceedings* 16: 162-166.
- WATTERSON, J. G. 1996. "Water clusters: pixels of life". En Hameroff, Kaszniak y Scott 1996, pp. 397-405.
- WEINBERG, S. 2003. "A unified physics by 2050?" *Scientific American Special* 13(1): 4-11.
- WESCHLER, L. F. 1990. "Limits of artificial intelligence". *Public Administration Review* 50: 576-577.
- WESTBROOK, G. L. 2000. "Seizures and epilepsy". Kandel, Schwartz y Jessell 2000, pp. 910-935.
- WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H., eds. 1983. *Quantum theory and measurement*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- WHITE, S. L. 1986/1997. "Curse of the qualia". En Block, Flanagan y Güzeldere 1997, pp. 695-717.
- WIGNER, E. P. 1967. "Remarks on the mind-body question". En E. Wigner, *Symmetries and reflections*, pp. 171-184. Bloomington, IN: Indiana University Press. (Reimpreso en Wheeler y Zurek, pp. 168-181; también en Heil 2004, pp. 866-877).
- WILSON, R. A. y KEIL, F. C., eds. 1999. *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. Cambridge, MA: MIT Press.
- WOLF, F. A. 1999. "A quantum physics model of the timing of conscious experience". En Hameroff, Kaszniak y Chalmers 1999, pp. 359-366.
- ZEMAN, A. 2002. *Consciousness: a user's guide*. Londres: Yale University Press.
- ZOHAR, D. 1990. *The quantum self: human nature and consciousness defined by the new physics*. Nueva York: William Morroe.
- \_\_\_\_\_. 1996. "Consciousness and Bose-Einstein condensates". En Hameroff, Kaszniak y Scott 2000, pp. 439-450.
- ZUREK, W. H. 1990. "Physics, mathematics, and minds". *Science* 248: 880-881.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA IZTAPALAPA

---

---

**El modelo cuántico de la conciencia de Penrose y Hameroff:  
una introducción y evaluación crítica**

Tesis que presenta:  
ISRAEL GRANDE GARCÍA,

para obtener el grado de  
*Maestro en humanidades, línea historia y filosofía de la ciencia*

Director: Dr. SÍLVIO JOSÉ MOTA PINTO

México, junio de 2006