LA FISIOLOGIA DE LAS IMAGENES MENTALES*

Dr. Walter J. Freeman**

Todo el mundo sabe lo que son las imágenes mentales por experiencia propia. Constituyen la base y el sustrato de nuestra vida consciente tanto en la vigilia como en el sueño. Estas imágenes no son solamente visuales sino que todos los sentidos participan en ellas: los ojos, los oídos, el pelo, los músculos, las articulaciones, y en especial, y para el propósito de este ensayo: la nariz. Para introducir este tema quisiera empezar con la descripción de algunos experimentos en animales, porque todos los animales que tienen cerebro comparten esta capacidad de formar imágenes mentales. El origen de esta idea proviene de la Antigüedad, de la escuela de Hipócrates, pero comenzaremos comentando a un naturalista alemán que se llamaba Jacob Von Uexkull. Publicó un libro (15) en 1934, titulado *"Streifzuge durch die Umwelt"*, en el cual describió sus teorías sobre la existencia y la naturaleza de las imágenes del medio ambiente en el animal y en el hombre. Los zoólogos las conocieron como *search images,* es decir, imágenes de búsqueda. La figura 1, que tomé de su libro, es un ejemplo de estas imágenes. En él se relata la siguiente anécdota: Una mujer había comprado una nueva jarra de leche. Cuando se sentó a la mesa, la jarra estaba frente a ella, pero no la vio y pidió que se la trajeran. La razón de este fenómeno fue que la imagen de búsqueda de la jarra vieja (más fuerte) ocultó a su vista la nueva (más débil).

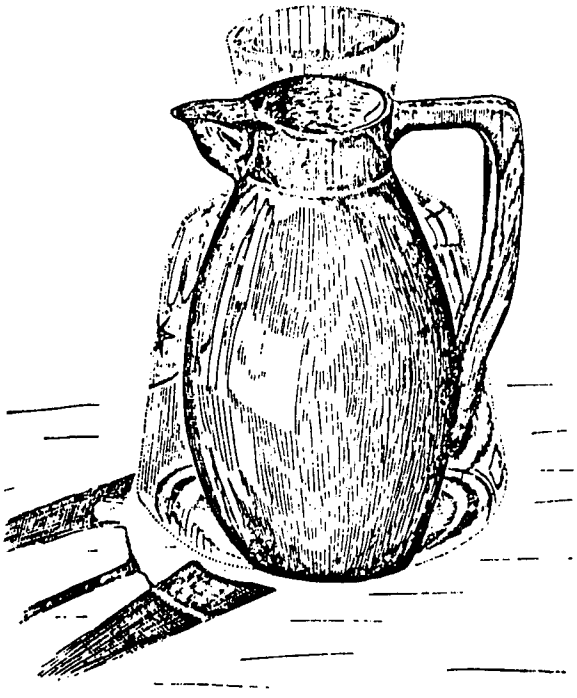

Figura 1.
La imagen de búsqueda de una jarra de leche. Uexkull y Krisaat, 1934

Von Uexkull aplicó esta teoría a todos los animales, tanto vertebrados como invertebrados. En la figura 2 podemos ver otro de sus dibujos en el que el autor ordena a su perro que le traiga su bastón. En el cerebro del perro observamos la imagen de búsqueda del bastón, la cual se formó debido a la orden de su amo.

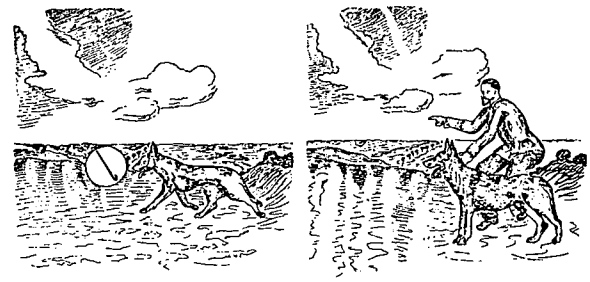

Figura 2.
La imagen de búsqueda dentro de un perro. Uexkull y Krisaat, 1934.

La ideas de Von Uexkull no fueron aceptadas por sus colegas en aquel tiempo, debido a la falta de evidencia experimental. Sin embargo, en los cincuenta años siguientes se ha acumulado evidencia que fundamenta fuertemente este concepto. Quisiera comentar un ejemplo de mérito excepcional. Es un experimento realizado por dos zoólogos, Pietrewicz y Kamil (12), con la cianocita común. Estos pájaros se alimentan de varios tipos de mariposas. Los investigadores obtuvieron dos tipos de mariposas y las colocaron sobre la corteza de árboles del género que prefería cada mariposa para esconderse. Fotografiaron cada árbol con su mariposa y después sin mariposa, hasta acumular muchas diapositivas. Después entrenaron a algunas cianocitas a mirar las diapositivas una por una, y a picotear una tecla cuando la diapositiva tuviera una mariposa. Si el pájaro acertaba recibía una semilla como recompensa. Si se equivocaba al picotear en ausencia de la mariposa, tenía que esperar un minuto antes del siguiente ensayo.

** Basado en la conferencia impartida en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM el 20 de febrero de 1981.*

*** Departamento de Fisiología-Anatomía, Universidad de California Berkeley, Berkeley Ca. 94720 E.U.*

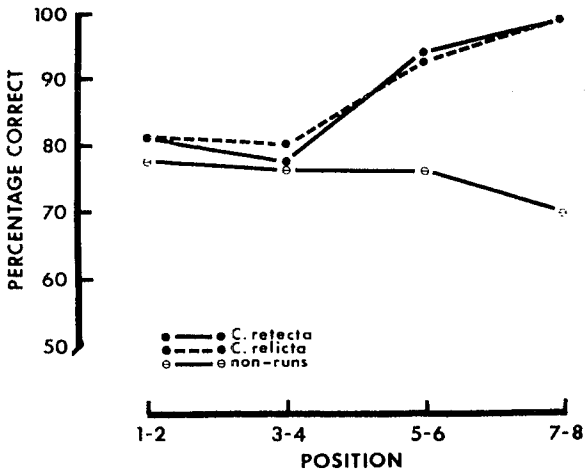

Figura 3.

La cianocita muestra imágenes de búsqueda. Pietrewicz y Kamil, 1979.

Sus resultados se muestran en la figura 3. En la línea de abajo *(non-runs)* vemos el nivel de picoteo ante las fotografías sin mariposa. Las dos líneas de arriba muestran dicho nivel en las fotografías que tenían una mariposa de uno *(c. retecta)* u otro tipo *(c. relicta).* La ordenada muestra el porcentaje de las respuestas correctas. La abscisa muestra el número de ensayos secuenciales en los que los investigadores pusieron la misma mariposa. Cuando el número de ensayos secuenciales con la misma mariposa era desde cinco hasta ocho, la tasa de respuestas correctas se acercaba al cien por ciento.

La interpretación de este hecho es que las cianocitas se formaron una imagen de búsqueda de cada mariposa en aproximadamente cuatro ensayos y entonces pudieron identificarla más fácilmente. Cada imagen perduraba durante las presentaciones subsiguientes, mientras se usara. Cuando ya no era útil, cambiaba a otra forma.

Este hecho se ha confirmado en casi toda clase de vertebrados y también en algunos invertebrados. Podemos decir entonces, que los animales pueden formar y usar imágenes de búsqueda.

Nuestra pregunta es la siguiente: ¿Dónde se encuentran las imágenes de búsqueda en el cerebro? Para responder, describiré una experiencia que tuve con un paciente hace veinticinco años, cuando era médico del hospital John Hopkins. Una muchacha de quince años llegó con fiebre y dolor de cabeza. Supimos que tenía un absceso en el cerebro, pero no sabíamos donde estaba. Un neuropediatra pudo localizar el absceso después de analizar algunas imágenes dibujadas por la muchacha. Dos de los ejemplos que recuerdo se muestran en la figura 4. La imagen superior es el dibujo de una flor y la inferior es una bicicleta. Los dibujos mostraban un lado más pequeño que el opuesto. A causa de la disminución a la izquierda de los dibujos de la paciente, supimos que el absceso estaba en el lóbulo parietal del hemisferio derecho del cerebro. Después de una semana de tratamiento con un antibiótico, los dos lados del dibujo se aproximaban en tamaño; y después de tres semanas, las diferencias desaparecieron.

Habíamos observado un experimento natural, en el cual se había dañado la maquinaria de la formación

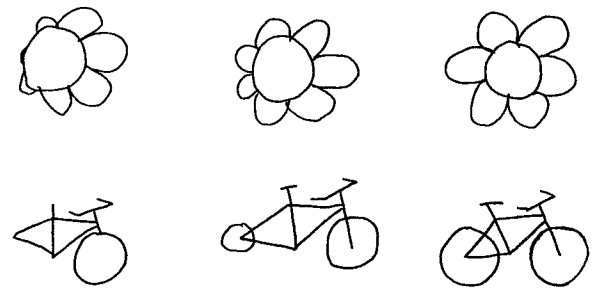

Figura 4.

Dibujos de una muchacha con un absceso en el cerebro derecho.

de las imágenes de búsqueda del medio ambiente en el lóbulo parietal.

Ahora bien, ¿cuáles son los tipos fundamentales de las imágenes mentales? He definido cuatro tipos. El primero es la imagen de búsqueda. El segundo es la imagen del cuerpo. Recuerdo un ejemplo de pérdida de la imagen del cuerpo. Se trataba de una viejecita que fue llevada al hospital con una trombosis en el cerebro derecho. Estaba inconsciente a su llegada, pero al cabo de un día se despertó; y despúes de tres días, pidió un cepillo, un espejo y algunos cosméticos. Cuando volví para verla después de una hora, me confundió; la mujer se había peinado cuidadosamente el lado derecho de la cabeza, y se había aplicado lápiz labial solamente en el lado derecho de la boca. Le di de nuevo el espejo y le pedí que se mirara la cara cuidadosamente. Lo hizo y me preguntó. "¿Qué pasa?" Había perdido una parte de la imagen del cuerpo; para ella, el lado izquierdo ya no le pertenecía.

Por el contrario, tenemos el fenómeno del miembro fantasma. Cuando un hombre ha perdido un miembro por un accidente o por una amputación, siempre le parece y siente que el miembro está todavía presente en su cuerpo. La razón es que la maquinaria de la corteza que forma la imagen del miembro, funciona normalmente a pesar de la pérdida de éste.

El tercer tipo de imagen mental es la imagen del movimiento. Puedo demostrarlo de una manera sencilla. Si se mueven los ojos voluntariamente, el medio ambiente no parece moverse, pero si se pone el dedo sobre el globo del ojo y se aprieta ligeramente para mover el globo, el medio ambiente parece moverse. La razón es la siguiente: cuando damos una orden para mover los ojos, la imagen de este movimiento futuro se forma en el cerebro y se trasmite a las neuronas motoras. Se trasmite una copia de este mandato a la corteza sensorial visual, para informar a las neuronas sensoriales que ocurrirá un movimiento; pero a causa de este mandato y no a causa de un movimiento del medio ambiente. Los zoólogos alemanes (9) llamaron a este fenomeno "una copia de eferencia". Cuando uno mueve el globo con el dedo, falta esta copia y las neuronas sensoriales interpretan que el mundo se mueve.

En el cerebro existe la maquinaria para hacer imágenes de todos los movimientos de nuestra vida consciente. Cuando un paciente sufre una trombosis cerebral, especialmente de los ganglios basales, de tal manera que pierde la capacidad de formar las imágenes de movimiento, el resultado es una parálisis espástica.

El cuarto tipo de las imágenes fundamentales es más difícil de entender. Quisiera introducir este tema con una historia de un paciente que sufría de epilepsia. A manera de tratamiento, el neurocirujano extrajo el hipocampo de ambos lados del cerebro. A continuación trascribo una traducción abreviada de la descripción que el fisiólogo inglés, Colin Blakemore (1), escribió de su caso:

"Henry vive en un mundo estrechamente limitado, tanto en el espacio como en el tiempo. Después de la intervención en su cerebro, su mundo dura solamente algunos minutos. No sabe nunca el día de la semana, el año o cuantos años tiene. A pesar de que su médico, Brenda Milner, ha estado innumerables horas con Henry, es una desconocida para él. Es como si se encontraran de nuevo cada vez que ella lo visita. Su inteligencia no se ha reducido y conoce clara y dolorosamente sus defectos. Está avergonzado continuamente de la ausencia de su mente. Dice: 'Ahora temo equivocarme; en un momento todo está claro, pero luego olvido lo que ha pasado. Es como cuando me despierto de un sueño.' Cada día está más ensimismado. Hace dos años que su tío favorito murió, pero Henry sufre de la misma aflicción cada vez que su médico le habla del suceso".

Este defecto se conoce como pérdida de memoria a corto plazo. Un psicólogo norteamericano, llamado Edward Tolman (14), hizo una descripción más amplia y eficaz. Introdujo el término técnico, "el mapa cognoscitivo". Tolman trabajó mucho con las ratas y de sus resultados concluyó que cada rata tiene una imagen de su medio ambiente, es decir, un mapa cognoscitivo.

En la figura 5 vemos un ejemplo de su trabajo. Tolman muestra la imagen de un laberinto en el cual una rata sale de una caja, corre por un portillo y encuentra una recompensa en la cámara final. Después de que las ratas aprendían este laberinto, Tolman las examinaba en un laberinto más complicado (figura 6), con varios portillos, pero con el portillo original cerrado. Sus resultados se muestran en la figura 7. Las ratas preferían correr por el portillo que apuntaba directamente a la cámara de la recompensa. Es decir, cada rata guiaba su comportamiento con un mapa cognoscitivo del medio ambiente. Este hecho fue descubierto algunos años antes por Karl Lashley, quien encontró que algunas ratas empujaban hacia arriba la cubierta de la caja y corrían sobre el laberinto para obtener su recompensa, demostrando también la presencia de un mapa cognoscitivo.

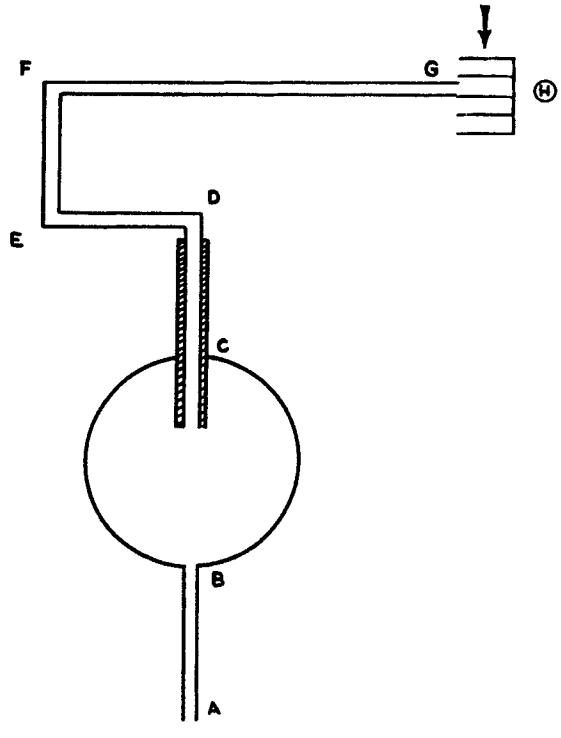

Figura 5.
Un laberinto para ratón. Tolman, 1948.

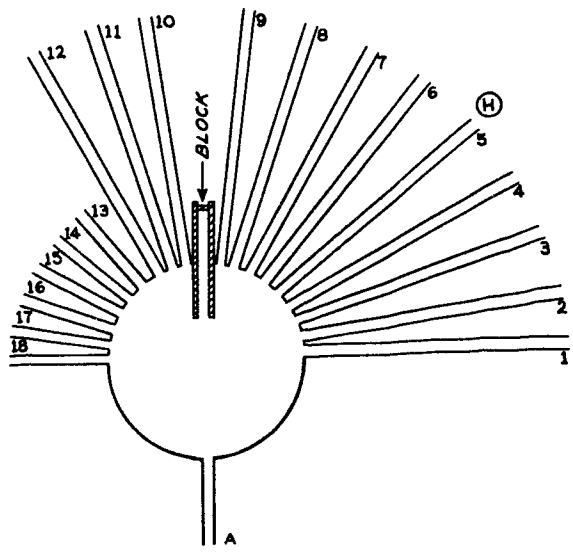

Figura 6.
Otro laberinto. Tolman, 1948.

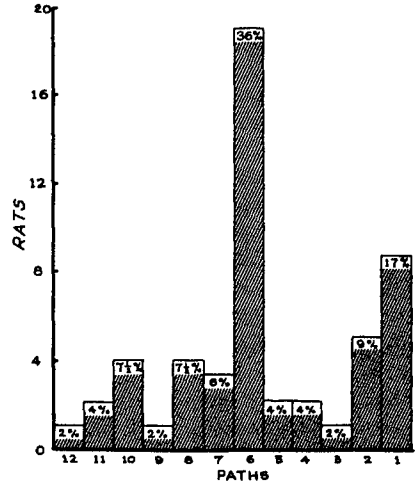

Figura 7.
Los resultados muestran la presencia de un mapa cognoscitivo en el ratón. Tolman, 1948.

La siguiente pregunta es: ¿Dónde se encuentran los cuatro tipos básicos de imágenes mentales en el cerebro? Nuestra respuesta es más fácil de comprender cuando miramos un cerebro más sencillo que el del

hombre y el de la rata. He elegido el cerebro de la salamandra, que el neurólogo comparativo, Charles Judson Herrick, identificó como el cerebro vertebrado más generalizado (7). Este pequeño animal es muy tímido pero es un terror voraz y predador de todos los habitantes más humildes de su estrecho mundo.

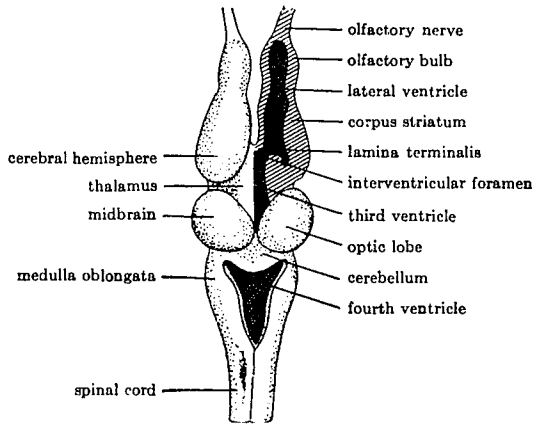

Figura 8.
Un cerebro vertebrado generalizado. Herrick, 1962.

Una disección de la cabeza de la salamandra muestra que los dos hemisferios son del tamaño de dos frijoles. Al final de cada hemisferio se encuentra el nervio olfativo primario que corre desde la nariz hasta el bulbo olfatorio. En la figura 8 vemos un dibujo de Herrick (8) que muestra que cada hemisferio tiene varias partes. Hacia el frente está el bulbo; en el medio se encuentran el hipocampo y el septum; lateralmente, la corteza piriforme; y ventralmente, el núcleo amigdaloide y el cuerpo estriado. Estas partes forman el lóbulo límbico. Este término fue introducido por Paul Broca (2) en 1878, para referirse a esas partes del cerebro que forman un circuito cerrado. En el centro hay un área de la corteza transicional que recibe su aferencia de los ojos, los oídos y el cuerpo, vía el tálamo.

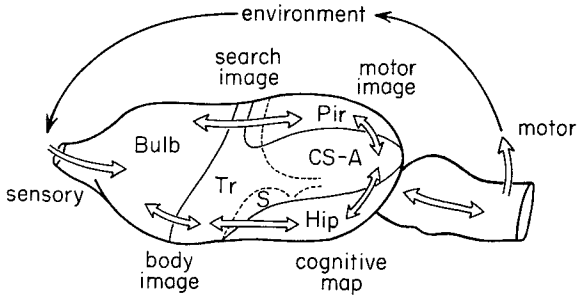

Figura 9.
Un esquema del lóbulo límbico. Freeman, 1981.

Creo que los cuatro tipos de imágenes se encuentran en el cerebro de la salamandra como lo he dibujado en la figura 9. Las imágenes de búsqueda olfatoria se hallan dentro del bulbo y la corteza piriforme (Pir). La imagen de movimiento se encuentra en el estriado, y las imágenes corporales en el área transicional (Tr). Según los investigadores ingleses, O'Keefe y Nadel (11), el mapa cognoscitivo se halla dentro del hipocampo (Hip). Era éste del que Henry carecía.

La misma forma de lóbulo límbico se encuentra en los reptiles.

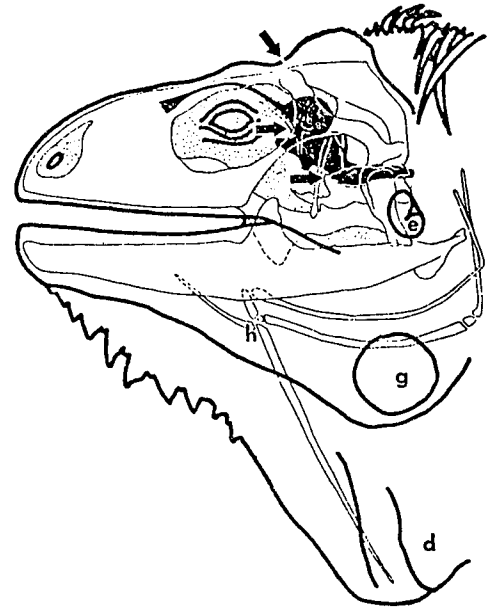

Figura 10.
La cabeza de la iguana. Distel, 1976.

Un ejemplo de esto se observa en la iguana (figura 10). La parte de este cerebro, que es homólogo a la neocorteza en el mamífero, es un núcleo debajo del ventrículo que se llama cresta ventricular dorsal. Las distintas partes que forman el lóbulo límbico constituyen una lámina lisa cerca del núcleo. El cerebro de la iguana se encuentra al revés si se compara con el de los mamíferos, por lo que se facilita el acceso a esta estructura superficial para el análisis sistemático de las propiedades fisiológicas. Es un animal bastante grande, apacible, inocuo e interesante en su conducta motivada. No es posible interesarse seriamente en la base neurológica de la conducta sin mirar cuidadosamente a ésta muy apropiada estructura límbica.

Todas las partes del cerebro funcionan como un todo. Por ejemplo, cuando una salamandra tiene hambre, forma una imagen de búsqueda para lograr obtener algo de comer. Después forma una sucesión de imágenes de movimiento para cambiar la actividad de sus receptores olfatorios y, de esta manera, hacerse conformar a la imagen de búsqueda. Esto lo hace para mover su cuerpo en el medio ambiente. Debe registrar cada movimiento y su resultado en el hipocampo, para decidir su siguiente movimiento. ¡Quizás algunos piensen lo fácil que sería ser una salamandra!

Mi pregunta es: ¿Qué forma física tiene una imagen mental? Es una configuración espacial y temporal de la actividad de la corteza. Para demostrarlo he colocado muchos electrodos en una parte pequeña del bulbo olfatorio del conejo, donde esperamos ver las imágenes de búsqueda olfatorias (5). Para este propósito he fabricado un arreglo de 64 electrodos y los he colocado en la superficie lateral del bulbo. La distancia entre los electrodos es de medio milímetro y el tamaño del

arreglo es de 4 x 4 mm.

Creo que la configuración de la actividad neuronal que constituye una imagen de búsqueda olfatoria se distribuye sobre el bulbo olfatorio por la misma razón que los receptores olfatorios se distribuyen sobre la superficie de la mucosa que recubre el interior de la nariz y proyectan topográficamente sus axones al bulbo (4). Los receptores para cada olor se encuentran distribuidos en forma única y espacial en la nariz, y también sus axones terminan guardando un esquema unico en el bulbo. Cuando exponemos un animal a un olor, podemos esperar que el bulbo reciba un patrón de excitación que corresponda a aquel olor, pero no podemos anticipar que la configuración de la actividad del bulbo que resulte, deba corresponder al olor.

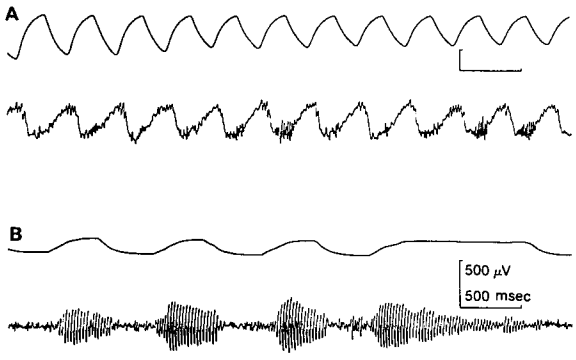

Figura 11.
Ondas electroencefalográficas (trazos superiores) durante la respiración (trazos inferiores).

La figura 11 muestra la actividad neuronal en forma de ondas electroencefalográficas del bulbo de un conejo. Cada inhalación se acompaña de una ráfaga de una onda neuronal, que dura un décimo de segundo y que tiene una frecuencia desde cuarenta hasta ochenta ciclos por segundo. El trazo superior tiene el registro de la respiración y el trazo inferior tiene las ráfagas que siguen cada inspiración, las cuales he registrado con un electrodo.

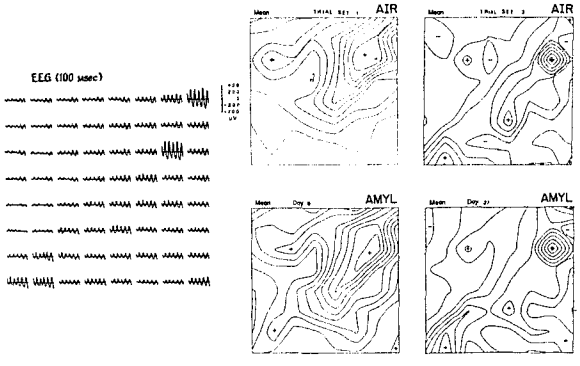

Figura 12.
Patrones espaciales de las ondas electroencefalográficas del bulbo de un conejo. Freeman y Schneider, 1982.

La figura 12 muestra los trazos que he registrado simultáneamente con 64 electrodos. En todas partes del bulbo, las ondas tienen la misma frecuencia. Por esto las ondas manifiestan un suceso unificado, que yo llamo "paquete ondulante". Este trae la señal de los receptores, se recibe por el bulbo y despúes se trasmite a la corteza piriforme (4). Mido el paquete ondulante para calcular la raíz media cuadrada de la amplitud de cada uno de los 64 trazos en cada ráfaga. Presento los resultados en un mapa de contornos de amplitud, así como un mapa de sierras que muestra los picos y los valles. Cada mapa puede darnos la configuración espacial de una ráfaga.

La configuración no cambia cuando doy al conejo cualquier olor (6) pero cuando entreno a un conejo a esperar un olor proporcionándole un choque eléctrico cada vez que le doy el olor, la configuración del paquete ondulante cambia, aprendiendo la conexión entre el choque y el olor. Después que el conejo ha aprendido a esperar el choque con el olor, vemos la nueva configuración, tanto antes como durante la llegada del olor. La expectativa del conejo, es decir, su imagen de búsqueda olfatoria, determina la configuración de las ondas y no el estímulo olfatorio. Por esta razón creo que el paquete ondulante constituye la imagen de búsqueda olfatoria.

Mi última pregunta es: ¿Cómo se forman las imágenes mentales? La base de mi respuesta es un modelo dinámico del bulbo olfatorio, que he expresado con ecuaciones diferenciales (5) y con el cual he repetido los patrones de las ráfagas y otras formas de la actividad de las neuronas del bulbo. Hay dos aspectos de este modelo que son muy importantes. El primer aspecto es que las neuronas excitatorias e inhitorias del bulbo forman juntas innumerables circuitos cerrados que causan la oscilación que se manifiesta en las ráfagas. El segundo aspecto es una función no lineal que caracteriza cada neurona, y que determina la sensibilidad de su axón ante la corriente dendrítica. A causa de esta función no lineal, las neuronas que han sido sensibilizadas a un olor en el proceso de entrenamiento, multiplican su actividad enormemente, por lo que es muy importante comprender que un estímulo olfatorio que actúe sobre los receptores, no activa simplemente un grupo de neuronas específicas. Este estímulo pone a un conjunto de neuronas sensibilizadas dentro de una región crítica de su función no lineal. Concluido este proceso, el conjunto genera su propia actividad. La configuración espacial de esta actividad toma su dirección del patrón de conexiones sinápticas de las neuronas sensibilizadas, es decir, un estímulo evoca una configuración de actividad en el bulbo que es un recuerdo de estímulos pasados o, en otras palabras, una imagen de búsqueda. Por esta razón, el recuerdo de una clase de estímulos, y no el propio estímulo, determina el patrón de las ondas electroencefalográficas del bulbo.

Es demasiado complicado comentar aquí y ahora los detalles del mecanismo dinámico del bulbo, o la manera en que funciona el mecanismo de búsqueda. Solamente quisiera decir que esta propiedad no lineal del bulbo, de generar su propia actividad, es la clave para comprender los procesos de formación de las imágenes mentales. Esta propiedad se comparte con un gran número de procesos en física, química y biología, y tiene la propiedad de autoorganización. Según el químico belga, Ilya Prigogine (13), quien recibió el Premio

Nobel por su trabajo en esta área, las configuraciones de actividad en el tiempo y en el espacio emergen cuando un sistema con esta propiedad recibe un pulso de energía. Ha llamado a estos esquemas "estructuras disipativas", como siendo distintas de las estructuras de los cristales, porque se alimentan con la energía y mueren cuando la energía falta. La imagen de búsqueda y el paquete ondal, que son los dos lados de una misma moneda, también se alimentan con la energía que la sangre provee a las neuronas olfatorias, y son también estructuras disipativas.

Las ecuaciones de los sistemas con esta propiedad de autoorganización son las mismas, sea el sistema grande o pequeño. Por ejemplo, medimos un patrón de nubes en kilómetros y en horas. Es posible ver el patrón de una hoja de plástico con la asistencia de un microscopio electrónico (10), y medir el tamaño de estas pequeñas ondas en micrones; y los procesos de formación, en microsegundos. Podemos ver la estructura anatómica del bulbo que soporta las estructuras disipativas del bulbo en las secciones histológicas de la lámina de los glomérulos, paralelamente a la superficie del bulbo. Podemos medir tales estructuras, y lo que se encuentra en las figuras 11 y 12, en milímetros y segundos. Es decir, es posible medir los sustratos anatómicos y fisiológicos de las imágenes mentales.

Pienso que el aspecto más importante es el siguiente: El cerebro no es una computadora que haga lo que le ordenamos hacer. El cerebro tiene la propiedad de autoorganización que ninguna computadora tiene. El cerebro comparte esta propiedad con muchos otros sistemas en el mundo , pero es único en tanto que sus estructuras disipativas son reflexiones del mundo a través de neuronas sensoriales y sirven para guiar el comportamiento a través de neuronas motoras. Entre el ingreso y la salida tenemos la propiedad de autoorganización; es decir la capacidad de autodeterminación. Esta propiedad no es misteriosa. Surge de la sustancia química y de la estructura anatómica que determina la dinámica cerebral, y podemos comprenderlo de la misma manera como comprendemos otras dinámicas de nuestro mundo material.