

**Jean Piaget, Warren McCulloch.  
Mi perspectiva de las redes neuronales**

**Antonio M. Battro**

Hace 100 años Santiago Ramón y Cajal describía las primeras redes neurales en el sistema nervioso de invertebrados y vertebrados. Hace 50 años Warren McCulloch en colaboración con Walter Pitts diseñaron una red artificial compuesta de neuronas formales para computar proposiciones lógicas. Desde entonces, el avance prodigioso de las ciencias de la computación y de la inteligencia artificial ha enriquecido el estudio de los sistemas cognitivos del hombre. Por otra parte, la aplicación de las nuevas técnicas no invasoras para obtener imágenes del cerebro humano en funcionamiento han abierto un campo formidable a la investigación. El aporte sustancial de Jean Piaget sobre el desarrollo epigenético de los sistemas cognitivos, del niño al adolescente, deberá ser integrado a las nuevas corrientes de las neurociencias cognitivas. Será necesario estudiar las "redes cognitivas" de las operaciones mentales descritas por Piaget con el auxilio de las computadoras y de las imágenes cerebrales.

En este trabajo intentaré analizar algunos puntos poco conocidos de la obra de Piaget y de McCulloch desde mi propia perspectiva. He intercalado en el texto algunos comentarios secundarios con una tipografía de menor tamaño. Se trata de algo así como una "historia fractal" personal, donde un tema da origen a otro que abre una "ventana" nueva y merecería por sí mismo una indagación en profundidad y ese tema, a su vez, lleva a otros múltiples, etc. Este intento es en realidad un nuevo capítulo de un libro en preparación que versa sobre la creatividad científica y las "enredadas redes" que sustentan la génesis de una idea. La mejor manera de entender lo que sigue se hará algún día, espero, con un CD-ROM, por el cual se podrá "navegar" y no sólo leer en forma secuencial. Trataré de contar lo que yo he vivido personalmente en torno a las redes neuronales de McCulloch en la trama de la psicología de Piaget, en estos últimos 30 años.

## Lógica y neurología

En 1957 cursaba yo mi último año de la Facultad de Medicina de la Universidad de Buenos Aires. Era practicante mayor del Hospital de Clínicas y soldado conscripto en el Hospital Militar Central, HMC, donde alternaba agotadoras guardias médicas y militares. Tenía veintiún años y soñaba con irme a estudiar al extranjero. Pero quería aprovechar el tiempo del servicio militar obligatorio y comencé a trabajar en electro-encefalografía con Abraham Mosovich en el HMC. Allí con mi hermano Guillermo, estudiante de ingeniería, obtuvimos tal vez los primeros *vecto-encefalogramas* realizados en el país utilizando electrodos craneanos ortogonales siguiendo algunas ideas de la incipiente vecto-cardiografía clínica. Esos resultados no fueron publicados, pero me obligaron a estudiar la dinámica del cerebro humano. Además fueron una ocasión para recibir una enseñanza perdurable de Bernardo A. Houssay, el gran maestro de la fisiología argentina. Me atreví un día a presentarle mis primeros vecto-encefalogramas. Houssay, maestro de mi padre, me había dado la carta de presentación para la beca del gobierno francés, que obtuve poco después. Me atendió con su habitual deferencia y me dijo algo así "Ustedes los jóvenes tienden a hacer experimentos complicados, nosotros los viejos tratamos de simplificar". Nunca me olvidé de esta enseñanza de un premio Nobel. En Jean Piaget encontré el mismo espíritu, sus experimentos descuellan por su extremada simplicidad – y profundidad–.

Dos libros tuvieron en ese entonces gran influencia sobre mí: *El cerebro viviente* de Gray Walter (1953) y *Diseño para un cerebro* de Ross Ashby (1952). El pensamiento de Jean Piaget comenzaba también a asomarse en mi escenario intelectual en Buenos Aires, cuando compré el primer volumen de *Estudios de Epistemología Genética* en 1958. Me interesaba cada vez más por la epistemología y la neuropsicología. El libro clásico de Kurt Goldstein, *La estructura del organismo* (1939) ocupó gran parte de mis reflexiones en el último año de medicina. Patricio J. Garrahan, hoy una autoridad internacional en biofísica, entonces, candidato a practicante externo de mi "familia" en el internado del Hospital de Clínicas recuerda aún su asombro cuando le dije, exagerando la doctrina de Goldstein, "los reflejos no existen". Quería decir con ello que no tienen entidad como componentes aislados. En efecto Goldstein fué un precursor del "dromo" de McCulloch, es decir del *circuito regulador* entre el organismo y su medio, del cual el arco reflejo es sólo una parte. Años después en su texto clásico y aún no superado sobre autómatas y

computación, Marvin Minsky (1972) describió formalmente el circuito donde el medio se concibe como una máquina más acoplada al autómata finito. Lo mismo habían hecho Miller, Galanter y Pribram (1960) con su concepto de TOTE (*Test-Operate-Test-Exit*).

Después en París seguí, con genuina avidez intelectual, los cursos de fenomenología de Maurice Merleau-Ponty en el Collège de France, ante el escándalo de mis colegas experimentalistas quienes consideraban que *La estructura del comportamiento* de Merleau-Ponty no era, en gran medida, más que un brillante comentario filosófico al viejo libro de Goldstein. Recuerdo que el primer seminario que dí en el viejo laboratorio de psicología - en la pintoresca mansarda de la Sorbonne - (después de la desaparición del laboratorio de Wundt en Leipzig, pasaba a ser el más antiguo del mundo) me referí muy especialmente a K. Goldstein. No está mal recordar que Merleau-Ponty, por esos avatares de la burocracia universitaria francesa ¡fue el predecesor de Jean Piaget en la cátedra de psicología del niño en la Sorbonne! Piaget confiesa que ese nombramiento para reemplazar a Merleau-Ponty fue una de las mayores sorpresas de su vida. Es más, nunca aceptó la interpretación que Merleau-Ponty hiciera de sus trabajos de psicología de la percepción. Fué allí, en un curso de psicología de la Sorbonne sobre la imagen mental en los niños, donde conocí en 1959 por primera vez a mi futuro "patrón" y maestro ginebrino. Un comentario aparte merece esa primera clase en la Sorbonne. Tengo el recuerdo de un aula repleta de estudiantes con Piaget al frente moviendo su lápiz para explicar el rebatimiento de una varilla y escribiendo algunos datos en el pizarrón. Confieso que me pareció una exposición tan monótona que dejé de asistir a su curso. Me llevó muchos años para comprender - y aprovechar - la prodigiosa simplicidad de sus experimentos.

Recuerdo que, un día de sol en el Hospital de Clínicas- tal vez aburrido en alguna guardia médica - inventé una extraña notación simbólica para representar acciones y pensamientos. Por supuesto el intento fracasó. Tenía yo entonces escasos conocimientos de matemáticas y no sabía nada de lógica formal. Entonces mi practicante menor en el hospital era Roberto Montanelli y mi practicante externo Patricio Welsh, quienes se han convertido respectivamente en un psiquiatra renombrado y un eminente cirujano cardiovascular. Gracias a Montanelli pude empezar muchos años después mi práctica con computadoras en psicología clínica. McCulloch, salvando las distancias, dice que él también intentó inventar en su juventud, en los años 20, una nueva lógica para acciones y conocimientos, basada en los verbos

transitivos, pero se vió obligado a abandonar este intento pues había confundido el *flatus vocis* con el *Lekton* estoico. El ejemplo clásico de *Lekton* es "el puño en mi mano", una idea rectora que McCulloch tomó de Charles S. Peirce y le sirvió para incorporar el cálculo lógico en sus circuitos neuronales, es decir, para "encarnar la lógica" en la materia. Recién en 1961 comencé a estudiar lógica-matemática sistemáticamente en la Universidad de Friburgo con el destacado filósofo, el padre dominico Ignaz Bochenski, donde cursé la materia y rendí examen con mucho entusiasmo, contagiado - y estimulado - por el ejemplo de mi amigo y joven doctorando, Ignacio Angelelli, quien preparaba entonces su tesis pionera sobre Gottlob Frege. Allí empecé también a estudiar el pensamiento fascinante de C.S. Peirce. Recuerdo que Bochenski me convocó a dar examen de lógica en su celda del *Albertinum*, la residencia de los dominicos de Friburgo. Envuelto en su imponente capa negra, rodeado de libros, sacó un ejemplar de *Principia Mathematica* y me dijo que interpretara una fórmula que señaló con su dedo. A duras penas pasé el examen. Se trataba de la difícil notación del cálculo de relaciones. Años después, leyendo a McCulloch veo que cita precisamente el caso de una proposición que no puede ser formulada en términos aristotélicos "si el caballo es un animal entonces la cabeza del caballo es la cabeza de un animal". Ahora recuerdo que la fórmula que debí analizar en mi examen se refería precisamente a ese tema. Estas coincidencias son recurrentes en la vida de todo científico. Basta registrarlas, es como si el repertorio de "ideas fuerza" fuera mucho más restringido de lo que suponemos, giramos siempre en torno de pocas nociones fundamentales.

De Friburgo salté a Ginebra para participar en los seminarios de lunes de Piaget en 1961. La obra de Piaget era mirada con desconfianza por los lógicos de profesión y Bochenski publicó en 1950 una crítica severa del lógico E.W. Beth a la "lógica operatoria" piagetiana en la revista *Methodos*.. Mis viajes entre Friburgo y Ginebra resultaron así algo extraños para los colegas y amigos de ambas partes, pero me permitieron establecer un puente muy sólido entre dos estilos de pensamiento, el formal y el psicogenético. Estando yo en Friburgo, Piaget y Beth publicaron (diez años después de su polémica) un libro en colaboración llamado *Epistemología matemática y psicología* y el estupor llegó al máximo entre los lógicos. La estéril dicotomía se había desvanecido en favor de una nueva dinámica de mutua comprensión. Como bien dijo Seymour Papert: "lo que los lógicos critican de Piaget, es a menudo lo que hizo mejor". Es muy interesante señalar que en el capítulo final firmado por Piaget y Beth, se hace una referencia muy explícita (pgs. 329-330) a las redes de McCulloch y se prevé la

trascendencia futura de estas indagaciones casi esotéricas. Merece decirse que las redes neuronales eran casi desconocidas - fuera de un exclusivo círculo de expertos- por la comunidad filosófica y científica en 1961. La teoría del *perceptrón* de Frank Rosenblatt, fuente de esta nueva corriente computacional, data recién de 1959. En esencia se trata de un sistema algorítmico para tomar decisiones evaluando el peso de muchas evidencias de carácter local. En 1969 apareció el libro fundamental de Minsky y Papert sobre la limitación formal de los perceptrones. Quienes tuvimos el privilegio de vivir los primeros esbozos de esta interacción entre la psicología genética y la teoría de autómatas, no podremos olvidar jamás las apasionadas intervenciones de Papert y los comentarios estimulantes de Piaget en los seminarios del Palais Wilson de Ginebra en la década del 60. Se estaba gestando una nueva ciencia cognitiva ante nuestros ojos, pero el gran salto en el campo de las redes neuronales fué dado después de la muerte de Piaget en 1980. También las primeras computadoras en la escuelas se introdujeron en esa época. Todo comenzó a cambiar a gran velocidad desde entonces.

### **Mi primera red neuronal**

Dediqué mi primer año de egresado a la neuroanatomía. Comencé a investigar bajo la orientación de dos psiquiatras, Jorge Insúa y Juan Miguel Florit, la estructura histológica del órgano subforniano en el cerebro humano, una minúscula región casi desconocida en aquella época, sin barrera hemato-encefálica, ricamente vascularizada, con el ánimo de convertir a estas investigaciones en mi tesis doctoral. También concurrí al laboratorio de Moisés Pollak, fundado en Buenos Aires por Pío del Río-Hortega, el notable y heterodoxo discípulo de Ramón y Cajal. Allí aprendí a utilizar las técnicas de Cajal, las triples impregnaciones argénticas viradas al oro y la doble impregnación argéntica reducida, que además de ser insustituibles en la investigación anatómica permiten obtener preparados de una belleza superlativa. Diseñé entonces un circuito de conexiones nerviosas que ligaban a las "células parenquimatosas", en contacto con los vasos sanguíneos del órgano subforniano, con ciertas neuronas que observé en el mismo órgano. Como el personaje de Molière, comencé a construir "redes neuronales" sin saberlo. Este trabajo histológico- sin las redes- fué publicado recién en 1962. Fué el primero y último que escribí sobre neuroanatomía pero me sirvió para percibir la maravillosa complejidad arquitectónica del sistema nervioso. El órgano subforniano es objeto hoy día de intensa investigación, debido a los receptores de control de la presión arterial que se han detectado en él. Siempre me quedó la intriga

y ahora tengo la satisfacción de haber comprobado que no estaba desencaminado al proponer esa función de regulación a partir de la neuroanatomía. Ahora que rememoro mis primeros pasos por la ciencia, debo reconocer el gran influjo que esos estudios histológicos del sistema nervioso tuvieron en mi formación.

En 1958 recibí la beca tan anhelada del gobierno francés, abandoné el microscopio y partí raudo para París para dedicarme a la psicología experimental. Allí me incorporé al *Laboratorio de Psicología Experimental y Comparada* de la Sorbonne que dirigía Paul Fraise, con quien me doctoré en psicología con una tesis sobre la visión y los movimientos oculares en 1960. Mi estudio de los movimientos oculares pasó por varias etapas posteriores, con un gran impulso en 1979-80, gracias a la introducción del modelo fractal de Benoit Mandelbrot, y con nuevo vigor en 1994. Pero esto es otra historia. Fraise era discípulo de Michotte, quien a su vez lo había sido de Wundt. ¡Ahora tomé conciencia de que he sido "bisnieto" del creador de la psicología científica! Este tema de las "filiaciones espirituales" es de la mayor importancia en la historia de las ciencias. Nadie ha nacido por generación espontánea, y todos somos miembros de una gran familia con raíces y prolongaciones extensas e inesperadas. Con mi amigo filósofo, Eduardo García Belsunce, hicimos una traducción de una obra de Wundt absolutamente extraordinaria de comienzos de siglo, dedicada al logicismo y al psicologismo. Ese trabajo, desgraciadamente no se publicó pero me sirvió para escribir un artículo sobre el tema en un homenaje a Piaget (1966). La polémica filosófica del psicologismo y logicismo ha tomado un nuevo auge con los descubrimientos de las redes neuronales, pero se plantea hoy en un nivel insospechado para los protagonistas de comienzos de siglo. Los temas fundamentales, por lo visto, son recurrentes.

Mi tesis doctoral en medicina se postergó hasta 1985 cuando arribé, 25 años después, al otro extremo del arco que va desde el cerebro hasta la computadora. Esta tesis médica versó sobre la "computación clínica" título que inventé para designar la rehabilitación asistida por computadora de personas, especialmente niños con discapacidades mentales y sensoriales y motoras.

### ***Cibernética y cardiología:***

Recuerdo también, que a los 19 años compré en New York el libro clásico de Norbert Wiener *Cibernética*, dedicado a su gran amigo y colega

mejicano Arturo Rosenblueth. Yo me encontraba en los Estados Unidos, invitado por Alfredo Lanari, un querido amigo de mi familia. Resultó que Lanari había sido alumno de Walter Cannon en Harvard junto con Rosenblueth. Con Lanari trabajamos en cirugía cardíaca experimental provocando aleteo auricular en perros (con una droga llamada aconitina, usada por ciertas tribus indígenas en America como veneno para cazar). Lanari, tuvo que abandonar la Argentina como tanto otros científicos y pensadores por razones políticas y se desempeñaba entonces como jefe de investigaciones cardiológicas en el Jewish Hospital de Denver. Aún tengo una linda fotografía de ambos operando un perro. Lanari regresó a la Argentina en 1957 y dirigió como profesor de clínica médica uno de los centros más prestigiosos de medicina del país, que hoy lleva su nombre. Mi padre, cardiólogo, especialista en arritmias, falleció muy joven, en 1948, el mismo año de la publicación del texto clásico de Wiener en el Instituto de Cardiología de Méjico, que después dirigió Ignacio Chávez, a quien recuerdo cuando vino a Buenos Aires para dictar una conferencia en homenaje a mi padre en la Academia Nacional de Medicina. En 1993, Marvin Minsky, uno de los fundadores de la Inteligencia Artificial, me contó que él también había estudiado el tema del "flutter" auricular, desde el punto de vista matemático. Muchas coincidencias interesantes. También a Minsky eso le pareció curioso. La trama de cualquier narración sobre la génesis de una idea científica es siempre de una densidad incalculable.

El subtítulo de *Cibernética*:, "*Sobre el control y la comunicación en el animal y la máquina* " era muy sugerente para un joven investigador pero el formalismo matemático superaba mis conocimientos. De más está decir que no entendí casi nada y aún conservo el libro de Wiener en la biblioteca sin haber disminuído significativamente mi ignorancia. Sin embargo, leí muchas veces el capítulo llamado *Máquinas computadoras y el sistema nervioso* que se presta admirablemente como introducción para esta exposición de la obra de Piaget y McCulloch.

## **Biología y conocimiento**

Con ese título Piaget publicó en 1967 un libro insólito para aquel momento histórico. En efecto, asistíamos entonces a una explosión de conocimientos, a una fragmentación acelerada de las disciplinas más tradicionales: la biología molecular era un hecho formidable, las neurociencias tomaban nuevos e inesperados rumbos, la teoría de autómatas se convertía en una disciplina rigurosamente matemática, las tecnologías de la computación estaban cambiando la sociedad. Todo

divergía en forma "explosiva" y Piaget, en cambio, se lanzaba a una síntesis epistemológica muy general sobre "las relaciones entre las regulaciones orgánicas y los procesos cognitivos" (tal es el subtítulo de su libro). Los conceptos claves son homeorresis, creodos, epigénesis, asimilación genética, equilibración, auto-regulación, isomorfismo, anticipación. El autor más citado es C.H. Waddington, el célebre embriólogo británico, que fuera invitado por Piaget al Simposio Internacional de Epistemología Genética en 1964, como reconocimiento, supongo, por su búsqueda de un *tertium* entre el lamarckismo y el darwinismo, una tema muy caro al maestro de Ginebra. Pero del sistema nervioso, en forma explícita, ¡apenas se habla en este libro! (se lo trata muy sucintamente en el § 15 del capítulo V).

Esta carencia provocó el comentario irónico de un colega neurobiólogo que encontré en Harvard a quien le parecía muy extraño que en un libro sobre biología y conocimiento apenas se mencionara el cerebro. Una explicación simple sería que Piaget ¡nunca trabajó con animales de experimentación que contaran con un cerebro! Su modelo biológico de elección fueron los moluscos, del género *Limnea*, sobre el cual versó su tesis de doctorado en biología. Recuerdo que cuando presenté en Ginebra en 1980 un trabajo realizado en colaboración con los *Grupos de Estudios Cognitivos* de Brasil sobre la lateralidad hemisférica cerebral en los niños y las operaciones concretas y formales Piaget tuvo la amabilidad de invitar a un colega neurólogo para discutir conmigo pues él, modestamente me dijo, que "no se sentía competente" en el tema. Por otra parte, tampoco Piaget estudió en particular la neuroanatomía de los moluscos (una vez me confesó que siempre malograba sus cortes histológicos con el micrótomo) sino más bien su comportamiento global. Eso sí, describió con minucia en sus años mozos (1924) los efectos morfológicos en la *Limnea* de la contracción del músculo columelar y dos reflejos innatos: el reflejo "patelar" propio de organismos como la *Patella* marina, que adhiere al molusco más fuertemente a su sostén y el reflejo de retirada que lo deja caer ante un estímulo mecánico externo. El reflejo patelar dilata la abertura del opérculo y reduce la espira por contracción del músculo columelar. En cambio, el reflejo de retirada protege al molusco de los predadores. Piaget cuenta que siendo joven había inventado una especie de "dinamómetro para *Limneas*" con el fin de medir la fuerza del reflejo de retirada. Para los setenta de años de Piaget tuve el honor de contribuir con un trabajo matemático a la descripción de este modelo piagetiano, empleando la teoría de las catástrofes de René Thom. En mi modelo formal de 1976, ambos reflejos estudiados prolijamente por Piaget, actúan ligados al parámetro endógeno de una bifurcación del sistema dinámico, en una catástrofe de

tipo "frunce". Thom se mostró interesado por este trabajo y Piaget también quedó encantado con este *revival* de sus trabajos juveniles. Pero esta es otra historia.

Ahora podemos afirmar que no era en absoluto inapropiada la vía elegida por Piaget a través del estudio de los reflejos elementales en los moluscos. Merece señalarse que muchos avances espectaculares de la neurociencias de la década del 60, cuando Piaget publicó su libro, se debieron precisamente a investigaciones detalladas sobre el aprendizaje de neuronas específicas de ganglios de invertebrados como las *Aplysias* (Kandel, Spencer, Kupfermann, Lickey, Gerschenfeld, Bruner, Tauc, etc.). H. Gerschenfeld fué el primero que me habló de las *Aplysias* cuando trabajaba en la Facultad de Medicina de la Universidad de Buenos Aires en el laboratorio de Eduardo de Robertis, el descubridor de las vesículas sinápticas. ¡Hoy día estos circuitos anatómicos de la *Aplysia* se conocen en sus más íntimos detalles y se han convertido en los modelos de elección para estudiar muchas redes neuronales biológicas! Aunque Piaget no cita en su libro a los nuevos estudios sobre los circuitos neuronales de los moluscos, que ciertamente hubieran aportado agua para su molino, dedica en cambio una atención muy significativa a Warren McCulloch, quien había visitado su Centro de Ginebra, en compañía de Seymour Papert y Marvin Minsky. Piaget estaba visiblemente atraído por las redes neuronales de McCulloch-Pitts, tanto que cuando me tocó a mí integrar el grupo ginebrino de 1966 a 1968 y me ocupé del problema explícitamente, obtuve un gran apoyo de mi maestro. Es más, Piaget me invitó también a colaborar en la corrección de las pruebas de su libro, distinción que me dió la oportunidad inolvidable de poder compartir muchas horas de trabajo con el autor, en su indescriptible escritorio. Había tantos libros y papeles sobre la mesa, y en el piso, que me fué difícil encontrar un lugar para apoyar los míos y las pruebas de imprenta de *Biología y Conocimiento*.

Es interesante analizar las citas de la obra capital de McCulloch sobre redes neuronales en el libro de Piaget. En primer lugar, la mención es breve y se encuentra en el capítulo V: *La epistemología de los niveles elementales del comportamiento*. § 15. *El sistema nervioso y sus reflejos*, iii) *La red lógica de McCulloch* (pgs 256-259). Allí rinde un homenaje al célebre trabajo de 1943 que abrió un nuevo mundo a la interpretación lógica de los procesos nerviosos, los circuitos neuronales con y sin retroalimentación. La teoría, como es sabido, se basa en el postulado de neuronas formales que descargan una señal si y sólo si la suma (el "peso") de los impulsos aferentes supera el nivel del umbral de la neurona en cuestión. Por eso también se llaman "neuronas de umbral"

(*threshold neurons*). McCulloch y Pitts crearon un algoritmo para computar cualquier función booleana del cálculo proposicional clásico. Además la formalización se puede extender al cálculo de predicados de primer orden e incluso a una lógica probabilística. Se dice que las redes "representan" o "realizan" eventos. El mérito matemático, y la originalidad formal de estos circuitos estriba en que representan rigurosamente una clase de autómatas formales de carácter finito que no son triviales y que no tienen, empero, el poder general de cómputo de las máquinas de Turing. El aporte neurológico de estas redes es que, además, pueden servir de modelo a circuitos reales de subsistemas nerviosos. Esto está muy claro en la soberbia introducción que hiciera Seymour Papert al libro que reúne diferentes artículos de McCulloch, incluso algunas de sus poemas, con el sugestivo título, difícil de traducir, *Embodiments of Mind*. (1965). Según Papert el valor definitivo del modelo de McCulloch-Pitts es haber probado que el cerebro *debe* necesariamente funcionar como un tipo de máquina de cierta clase perfectamente definida.

En segundo lugar, Piaget establece claramente la distinción entre dos niveles: las estructuras (lógicas) inherentes a un funcionamiento, que intervienen a título de factor en su mecanismo interno, de las estructuras (lógicas) producidas por este funcionamiento, que sirven de punto de partida a funcionamientos de orden superior o "comportamientos". Las primeras son las estructuras de McCulloch-Pitts, las segundas son las estructuras sensorio-motoras y operatorias concretas o formales de Piaget. Entre ambas hay un abismo, que sólo colma un isomorfismo estructural. En tercer lugar, contra todo "neurologismo" Piaget afirma que si bien las redes de McCulloch-Pitts son "inherentes" ("inmanentes") a la actividad nerviosa, ellas no suponen mecanismo cognitivo alguno: "se trata de un mecanismo causal isomorfo a las implicaciones conscientes". En definitiva: "aunque de hecho sus conexiones sean isomorfas con las operaciones las neuronas no razonan en absoluto".

Como dato interesante, podemos mencionar también, las comparaciones que establece Piaget entre la obra de McCulloch y la de Kurt Goldstein. Este último pudo haber sido un remoto precursor del conexionismo y de las redes neuronales. Su combate contra el atomismo de los reflejos (1939), fue uno de los fundadores del movimiento gestaltista germano, y su apoyo a una concepción conexionista más amplia son recibidos con beneplácito por Piaget, generalmente hipercrítico respecto de la teoría de la Gestalt. Vale la pena transcribir el texto en su totalidad (pag. 114): "el sistema nervioso que constituye a

nuestro entender a la vez el modelo de los sistemas auto-reguladores y el órgano esencial de la cohesión global de los organismos superiores, ha sido concebido durante mucho tiempo como un agregado de reacciones aislables - los reflejos - y fué necesario esperar a K. Goldstein, el primero sin duda que vió en el sistema nervioso una red, en el sentido corriente del término. Pero como ignoraba la teoría algebraica de las redes y reticulados, lattices, etc, Goldstein quedó tan impresionado por su intuición que, bajo el pretexto de una Gestalt (como H. Driesch cuando descubrió la regulación embrionaria) volvió a una noción, particularmente vaga de totalidad transcausal. Fue necesario esperar a McCulloch para que la noción de red neuronal adquiriera forma racional e isomorfa a las redes lógicas operatorias."

Por mi parte pude establecer en 1967 un isomorfismo entre los cuaternos lógicos INRC de Piaget y las transformaciones proposicionales de M. Blum sobre las redes de McCulloch. Tuve la oportunidad de conocer personalmente a McCulloch en Ginebra y luego en 1968 en el MIT, ocasión en que le hablé de mi modelo de neuronas formales de los circuitos básicos del reflejo miotático. En mi trabajo me basé muy especialmente en los teoremas sobre redes neuronales con múltiples inputs de Manuel Blum, un destacado alumno de McCulloch, venezolano, a quien conocí en un seminario en el MIT. Años más tarde conversé también ocasionalmente con Oliver Selfridge, uno de los pioneros de la cibernética, autor con Minsky, - a instancias de McCulloch - de un simbolismo muy práctico de representar las funciones proposicionales, con cruces y puntos, notación que logré emplear en mi trabajo. Para entonces había ya hecho la presentación en sociedad de esta red de neuronas formales ante el grupo de neuropsiquiatría de Julián de Ajuriaguerra en Ginebra, el de neurociencias de Jacques Paillard en Marsella y el de psicología experimental de Paul Fraisse en París. A pesar de todo tardé diez años para publicar este trabajo sobre las neuronas formales y el reflejo miotático. Lo hice en 1977 en la revista que fundé en Araraquara, S. Paulo, *Estudos Cognitivos*, durante mi estada en el Brasil de casi una década. Me consuelo, salvando las distancias, pues McCulloch cuenta que un editor norteamericano "cajoneó" su artículo sobre finalidad y forma de la actividad nerviosa ¡por seis años!

**De las "células psíquicas" de Cajal y el "psychon" de McCulloch a los "vidrios con spin".**

Don Santiago Ramón y Cajal no se cansaba de admirar la "suprema belleza y la gran variedad de la floresta nerviosa". Con su verba fluída y

castiza de fin de siglo exclama: "¡como el entomólogo a caza de mariposas de vistosos matices, mi atención perseguía, en el vergel de las sustancia gris, células de formas delicadas y elegantes, las misteriosas *mariposas del alma*, cuyo batir de alas quién sabe si esclarecerá algún día el secreto de la vida mental!". A decir verdad nadie que se haya asomado a un microscopio y realizado una tinción de Cajal puede quedar insensible ante este prodigio de la naturaleza. que embargaba al gran sabio de "emoción estética incomparable". El mismo Cajal confiesa haber dudado de la teoría darwiniana de la selección natural - fruto implacable del azar y de la necesidad - viendo la perfecta arquitectura del cortex humano. La duda se hace hoy cada día más aguda entre muchos científicos. Una transposición de esta sublime organización se encuentra ahora en los complejísimos microcircuitos de las computadoras creadas por el hombre. Debo reconcer mi asombro cuando visité recientemente la oficina del Daniel Hillis, inventor de la *Connexion Machine*, la primera supercomputadora masivamente paralela (¡con 65.536 procesadores!) y vi un poderoso microscopio sobre su mesa para observar estos microcircuitos artificiales. ¡Qué hubiera dicho Cajal frente a esta nueva generación artificial de redes nerviosas!

En todo caso estos 100 años que van desde el descubrimiento de la neurona hasta la invención de los microprocesadores electrónicos no se pueden resumir fácilmente, tan inmensa es la red de conexiones históricas entre las neurociencias y las ciencias de la computación. Pero desearía citar algunos puntos singulares que conciernen el tema que nos ocupa. El primero es la descripción que hace Cajal en sus memorias (1923) de la neurona por excelencia, la *célula piramidal*.: "Uno de los hechos mejor apreciados entonces fue la reelación de la existencia constante en la corteza cerebreal de batracios, reptiles,aves y mamíferos del *corpúsculo piramidal*, que osé llamar, con audacia de lenguaje de que hoy me avergüenzo un tanto, *la célula psíquica*.. Su características son: forma alargada más o menos cónica o piramidal, orientación radial, ostentar constantemente un penacho dendrítico extendido por la capa molecular o tangencial del cerebro y un axón o expansión nerviosa dirigida a las regiones profundas, donde constituye vías de asociación intercortical o córtico-medular". Merece citarse aquí una frase del gran maestro español en la *Royal Society* de Londres (1894), en su famosa *Croonian Lecture*, que lo consagra definitivamente hace cien años como el fundador de la moderna neurociencia: "el órgano del pensamiento es, dentro de ciertos límites, maleable y capaz de perfección, sobre todo durante el período de su desarrollo, por una gimnástica mental bien dirigida...el cortex cerebral es semejante a un jardín lleno de árboles, las células piramidales, que envían sus raíces cada vez más hondo

produciendo más y más variedades de exquisitas flores y frutos". Esta es el preludio de lo que hoy llamaríamos "la plasticidad de los mapas representativos corticales". Conviene recordar, además, que Cajal fue alojado entonces en la casa de su colega Charles Sherrington. Una de las primeras aplicaciones de la neuroanatomía funcional a la fisiología provienen precisamente de su amigo Sherrington, quien identifica neuronas excitadoras e inhibidoras en sus diagramas y explicaciones de los reflejos, poniendo a prueba, por primera vez, los modelos de redes neuronales.

Es muy interesante comparar esta *célula psíquica*, o "mariposa del alma", con el *psychon* de McCulloch, que en último término también se reduce a una neurona. McCulloch confiesa en su interesante artículo autobiográfico *¿Qué es el número para que un hombre pueda conocerlo?:* "mi objetivo como psicólogo era el de inventar una especie de último evento psíquico o *psychon* que tendría las siguientes propiedades: primero, debería ser un evento tan simple que o bien sucede o no sucede. Segundo, debería acontecer solamente si una causa ligada a él hubiera sucedido antes, esto es, debería implicar un antecedente temporal. Tercero, debería proponer esto a *psychones* subsiguientes. Cuarto, éstos deberían componerse para producir los equivalentes de proposiciones más complicadas que sus antecedentes. En 1929 me pareció claro que estos eventos deberían ser considerados como los impulsos de tipo todo o nada de las neuronas, combinados por convergencia sobre la neurona siguiente para producir complejos de eventos proposicionales " (pgs.8-9). Finalmente en 1943, gracias a la ayuda del matemático Walter Pitts, McCulloch pudo formular rigurosamente las propiedades de una *neurona formal*, la expresión simbólica del *psychon* anhelado en su juventud.

De esta manera las fantasías juveniles de ambos sabios se encuentran: a la *célula psíquica* de Cajal en el cerebro se le contrapone la *neurona formal* de McCulloch en las redes neuronales. No está de más decir que hubo un puente personal entre ambos autores, tendido por Rafael Lorente de Nó, quien fuera discípulo aventajado de Cajal en España en los años 20 y luego colega de McCulloch en los Estados Unidos en los años 30. Es más, recorriendo los artículos más importantes de McCulloch comprobamos que uno de los autores más citados es precisamente Lorente de Nó, quien en 1934 dió pruebas definitivas sobre la arquitectura de las redes neuronales básicas del cortex que fueron imprescindibles para el trabajo de McCulloch. De esta manera las dos grandes corrientes - neurológica y computacional - se fusionaron en una nueva síntesis *neuro-lógica*. Y aquí entra a jugar finalmente la teoría de

los *isomorfismos* estructurales de Piaget entre las cadenas causales de los circuitos neuronales y las secuencias lógicas del pensamiento operatorio. Esta teoría no fue elaborada con suficiente rigor por Piaget, pero se encuentra en los fundamentos de su epistemología genética. A decir verdad, en el momento de su concepción era imposible avanzar mucho más de lo que intentó Piaget. Recién ahora podemos entrever alguna luz en el horizonte de la *neuro-lógica*. Y eso se debe a los considerables progresos realizados en los últimos años sobre redes neuronales o redes neurales (neural nets).

El caso más alejado de la arquitectura neuronal propiamente dicha es el de los "vidrios con spin" (*spin glasses*) expresión que los físicos modernos utilizan para designar sistemas materiales que "tienen memoria y aprenden". Claro está que su similitud con el tejido nervioso es nula, a diferencia de las redes formales de McCulloch que guardaban un "parecido" biológico. Una vez más se repite la historia de las grandes innovaciones, el primer automóvil era un coche de caballos sin caballos, el cine un teatro filmado. De la misma forma las primeras redes neuronales de la década del 40 fueron diseñadas siguiendo el modelo neurológico, con neuronas formales, pero "neuronas" al fin, de axones únicos, sinapsis inhibitoras o excitadoras, umbrales por sumación, inhibición, auto-excitación, etc. Los diseñadores de las actuales redes no se preocupan en absoluto por mantener la semejanza. Las neuronas formales se han convertido en células indiferenciadas, con conexiones arbitrarias como en las redes en capas de Hopfield. La modelización no exige ningún "isomorfismo estructural" a la Piaget, ni con el cerebro ni con la mente. Hoy, las redes neuronales contemporáneas se han despegado de sus arquetipos biológicos y bien podrían abandonar definitivamente su calificativo "neuronal". Ya nada tienen que ver con el sistema nervioso, vuelan sin batir las alas, por así decir, y muy bien. Pretenden ser metáforas funcionales del sistema nervioso, pero toda semejanza con neuronas reales es pura coincidencia...

En lo que sigue no haré más que parafrasear la interesante introducción del físico Roberto Perazzo (1994) a los efectos de apreciar la enorme distancia recorrida por la ciencia desde los primeros circuitos neuronales descritos por Cajal hasta el día de hoy. Los vidrios con spin son materiales no magnetizables donde se han introducido impurezas magnéticas. Como consecuencia de ello se genera un desorden interno. La magnetización de una sustancia depende del comportamiento de los electrones en sus órbitas, en particular de su momento angular, de su giro o spin. Cada átomo está rodeado como de un pequeñísima espira de corriente eléctrica que genera un imán microscópico cuya orientación es

perpendicular al plano de la espira de corriente. En cada material magnetizable cada spin "siente" un campo local, generado por los spins vecinos (como una neurona "siente" los estímulos de otra que se conecta sinápticamente con ella). En una sustancia magnética siempre hay una orientación preferida de todos los spins, todos se orientan de la misma manera. En un vidrio con spin, en cambio, no hay una única configuración preferida, se dice entonces que el sistema tiene un determinado grado de "frustración". Gracias a esta tensión residual, el vidrio con spin puede tener muchas "memorias", pues tiene muchas maneras de orientar sus spins. La suma de todas las interacciones magnéticas en un vidrio con spin define su energía. Las configuraciones más simples son las de menor energía (mínimos locales o valles). Cuando se da a la red una configuración inicial "para recordar", el sistema evoluciona desde ese estado y "cae" de valle en valle hasta el que corresponde al "recuerdo más parecido" al punto de partida. Esta muestra del lenguaje empleado por los físicos revela a las claras cuán alejados estamos del lenguaje *neuro-lógico* de McCulloch y de Piaget. Ello no obsta que nos encontramos aquí en presencia de un gran salto en la simulación de los procesos generales de memoria y de aprendizaje, que seguramente será de enorme utilidad al género humano.

## Epílogo

Piaget y McCulloch contaron con innumerables discípulos y colaboradores, McCulloch mismo menciona que fueron más de cien, los de Piaget sin duda fueron aún más. Algún día algún historiador de la ciencia deberá estudiar seriamente la dinámica de la irradiación intelectual de estas grandes mentes del siglo XX, elaborar los diagramas de las generaciones sucesivas (por ejemplo, yo pertenezco a la cuarta generación de la familia de discípulos directos de Piaget), diseñar los mapas geográficos de los nuevos territorios ocupados por su influencia, las derivaciones conceptuales, las variaciones metodológicas, etc. Entre todos ellos se destaca una persona que logra una notable unificación de las dos grandes corrientes emanadas de ambos maestros. Se trata de Seymour Papert, ahora profesor de educación en el MIT, colaborador asiduo y privilegiado de Piaget en Ginebra, autor del lenguaje computacional Logo, matemático destacado y pensador original. El supo como ninguno salvar las distancias entre la vertiente psicológica piagetiana y la lógica de McCulloch. Junto con su colega Marvin Minsky establecieron los alcances computacionales de las redes neuronales, los límites teóricos de los perceptrones y esbozaron una teoría muy general de la mente como red de "agentes" independientes. A

partir de esta fecunda colaboración Minsky escribió *La sociedad de la mente .La inteligencia humana a la luz de la inteligencia artificial (1986)*, que se ha convertido en un libro indispensable para comprender las nuevas corrientes del pensamiento.

A estos aportes teóricos se agregan ahora las novísimas *neurociencias cognitivas* . Un número creciente de notables investigadores, como Michael I. Posner, Stephen Kosslyn, Balázs Gulyas, entre otros, utilizan con éxito las nuevas técnicas no invasoras para estudiar el cerebro humano en situaciones de real interés cognitivo, (técnicas de emisión de positrones PET, resonancia nuclear magnética, MRI, etc). Posner trabajó también con Paul Fraise en París en el mismo laboratorio donde yo inicié mi carrera científica. De esta manera las *redes neuro-anatómicas* de Cajal, las *formales* de McCulloch, tanto como las *hipotéticas sociedades de la mente* de Minsky, se han visto enriquecidas por la descripción muy precisa, en algunos casos, de redes cerebrales funcionales para el lenguaje, los procesos de atención, la visión, la lectura, etc.

En este sentido se pueden establecer puentes entre las operaciones mentales a la manera de Piaget y determinados cauces neurales dentro del cerebro humano. En 1981 pude mostrar, con auxilio de mis colaboradores de los *Grupos de Estudios Cognitivos* de Brasil que la información que pasa de un cortex a otro por el cuerpo calloso facilita la adquisición de las operaciones concretas y formales de Piaget. Mi método fue emplear un input puramente táctil durante la manipulación unimanual de los objetos habituales (escondidos a la vista) en las pruebas operatorias de Piaget por niños zurdos y diestros. Comprobé que el camino más largo - con más neuronas intermediarias (o "agentes" en el sentido de Minsky) facilitaba la adquisición tanto de las operaciones lógicas procesadas predominantemente por el cortex izquierdo, como de las espaciales, procesadas en el derecho. En el lenguaje de las neurociencias cognitivas de hoy, ello implicaría la diferenciación de una *red cognitiva operatoria ipsilateral* y otra controlateral. Este hallazgo ha pasado casi desapercibido, salvo para un colega británico que hizo una tesis sobre este tema, (una colaboración positiva que realizamos por encima de la triste guerra de las Malvinas entre nuestros dos países) y otro canadiense que se propuso hacerla conmigo, pero las circunstancias no fueron propicias en mi país para seguir trabajando en este campo. También Noam Chomsky y Peter Wason me enviaron comentarios auspiciosos. Ahora, felizmente, con los nuevos métodos de las neurociencias cognitivas estamos en los umbrales

de dar un salto cualitativo en nuestro conocimiento de las operaciones mentales descritas por Piaget.

Para concluir, ha pasado más de un siglo desde las incursiones de Cajal sobre las redes nerviosas y casi medio siglo desde la formalización de las redes neuronales de McCulloch. En 1996 conmemoraremos el centenario del nacimiento de Piaget. El diálogo sobre la mente y el cerebro sigue abierto. Pero se ha introducido un tercer interlocutor, la máquina, que vino para quedarse y enriquecer el debate. En algunos casos esas computadoras pueden funcionar como verdaderas *prótesis mentales*, pero ésta será otra historia.

### **Nota final**

Mi modesta participación en esta historia de las redes neuronales y cognitivas puede tal vez esquematizarse en varias etapas y contribuciones puntuales: la primera - neuroanatómica - realizada en la Argentina (años 50) donde describí con la ayuda de técnicas de Cajal una red neuronal elemental en el órgano subforniano del tercer ventrículo; la segunda - lógica - en Suiza (años 60) basada en mi modelo formal con neuronas de McCulloch-Blum del reflejo miotático; la tercera - cognitiva - en Brasil (años 70) fundada en mis experimentos sobre redes neuro-cognitivas para operaciones piagetianas ipsilaterales y controlaterales. La cuarta - clínica - (años 80) se extendió al uso práctico de las prótesis informáticas en la rehabilitación de personas discapacitadas. La que ahora se inicia, intentaré realizar un estudio integrador de esas prótesis computacionales con las redes neuro-cognitivas mediante las nuevas técnicas de imágenes cerebrales.

**Referencias** (en orden cronológico, que servirá para recorrer la sucesión, a veces olvidada, de algunos textos capitales).

Wundt, W. "Psychologismus und logizismus" **Kleine Schriften**. Leipzig, 1910.

Cajal, S., R. **Recuerdos de mi vida**. Pueyo, Madrid, 1923.

Piaget, J. "L'adaptation de la *Limnea stagnalis* aux milieux lacustres de la Suisse Romande". **Revue Suisse de Zoologie**. 1924, 36, 263-531.

McCulloch, W.S., Pitts, W. S. "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity". **Bull Math. Biophysics**, 1943, 5, 115-113

(Re-editado en McCulloch, W.S. **Embodiments of Mind**. MIT Press, Cambridge, 1965. Con un prefacio de Seymour Papert *McCulloch y el nacimiento de la cibernética*, editado también en francés en **Cybernétique et épistémologie** Etudes d'Epistemologie Génétique, Vol XXII, Papert, S., Cellérier, G., Voyat, G.; Piaget J., ed, PUF, Paris, 1968).

Goldstein, K. **Der Aufbau des Organismus**.(trad. **The Organism**. New York, 1939).

Merleau-Ponty, M. **La structure du comportement**. PUF, Paris, 1942.

Merleau-Ponty, M. **Phénoménologie et perception**. Gallimard, Paris, 1945.

Wiener, R. **Cybernetics. Control and Communication in The Animal and The Machine**.Wiley, New York, 1948.

Beth, E.W. "A propos d'un traité de Logique". **Methodos**, 1950, 2, 258-264.

Ashby, W.R. **Design for a Brain**. Wiley, New York, 1952.

Minsky, M. **Neural nets and the brain-model problem**. Doctoral Diss. Princeton University. Princeton, NJ. 1954.

Kleene, S.C. "Representations of events in nerve nets and finite automata", en Shannon, C.F., McCarthy, J., eds, **Automata Studies**, 1956, Princeton University Press, Princeton, 1956.

Walter, W. G.: **The Living Brain**. New York, Norton, 1953.

Miller G., Galanter, E., Pribram, K. **Plans and the Structure of Behavior**. Holt, New York, 1960.

Battro, A.M. **L'étendue du champ perceptif en fonction du temps d'excitation**. Thèse d'Université. Université de Paris. 1960

Beth, E.W., Piaget, J. **Epistémologie mathématique et psychologie. essai sur les relations entre la logique formelle et la pensée réelle**. PUF, Paris, 1961.

Rosenblatt, F. **Principles of Neurodynamics**. Spartan, New York, 1962.

Battro, A.M. "Acerca de una estructura poco conocida en el sistema nervioso central: el órgano subforaminal". **Acta Neurológica Latinoamericana**, 1962, 8, 15-20

Blum, M.: "Properties of a neuron with many inputs" en **Principles of Self Organization**. Foerster, H.v., Zopf, G.W., Pergamon, Oxford, 1962.

Battro, A.M. "Psychologisme et épistémologie génétiques" en **Psychologie et épistémologie génétiques. Thèmes piagetiens**. Bresson, F., Montomollin, M. de, eds, Dunod. Paris, 1966.

Piaget, J. **Biologie et connaissance. Essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs**. Gallimard. Paris, 1967. Capítulo V. La Epistemología de los niveles elementales de comportamiento. §15. El sistema nervioso y los reflejos. iii. La red lógica de McCulloch (págs. 256-259).

Battro, A.M. Estructura de un circuito lógico elemental. Un modelo lógico de los reflejos miotáticos. **Estudios Cognitivos**. Araraquara, vol 2. 1977. (Re-edición del trabajo presentado en el *Centre International d'Epistémologie Génétique*, Genève 1967).

Minsky, M. **Computation. Finite and Infinite Machines**. Prentice-Hall, New York, 1967

Papert, S., Minsky, M. **Perceptrons. An introduction to Computational Geometry**. MIT Press, Cambridge, 1969.

Piaget, J. **Essai de logique opératoire**. Texte établi para J. B. Grize. Dunod, Paris, 1972.

Battro, A.M. "Morphogenèse des Limnées, adaptation vitale et théorie des catastrophes" **Bulletin de Psychologie**, Paris, 1976-77, 3-9 (pgs.137-149).

Battro, A.M. " Hemispheric lateralization in the development of spatial and logical reasoning in left and right-handed children". **Archives de Psychologie**, 1981, 49, 83-90.

**Battro, A.M. Computación y aprendizaje especial. Aplicaciones del lenguaje Logo en el tratamiento de niños discapacitados. El Ateneo. Buenos Aires, 1986.**

**Minsky, M. La sociedad de la mente. Galápago. El Ateneo. Buenos Aires, 1986.**

**Perazzo, R. De cerebros, mentes y máquinas. Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires, 1994.**

**Posner, M.I., Raichle, M.E. Images of Mind. Scientific American, New York 1994.**