

## ESTUDIO HISTORICO DE LA INFLUENCIA DEL CONEXIONISMO EN LA CIENCIA COGNITIVA ACTUAL

J.C. RUIZ  
M.J. SOLER  
C. DASI  
S. ALGARABEL  
A. PITARQUE  
Universidad de Valencia

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivos llevar a cabo una revisión de las etapas por las que se ha desarrollado el conexionismo desde la formulación de las primeras ideas sobre las que se asienta este enfoque hasta la actualidad. Cuatro son los periodos históricos que hemos podido diferenciar en este estudio: un momento inicial ligado a la tradición asociacionista; un segundo periodo que se extiende desde la década de los cuarenta hasta finales de los sesenta con un claro interés por la simulación basada en el funcionamiento cerebral; un tercer momento que se prolonga a lo largo de la década de los setenta caracterizado por una dura crítica a los sistemas formales lógicos; y un cuarto periodo, iniciado a partir de los ochenta, de resurgimiento de los modelos conexionistas. Además el estudio de esta cuarta etapa se ha complementado con un análisis objetivo del impacto que las publicaciones sobre este tema han tenido en la ciencia cognitiva actual.

El conexionismo se ha evidenciado como uno de los enfoques más influyentes en la psicología cognitiva actual. De hecho su impacto se ha extendido a distintas áreas de interés psicológico que van desde la percepción, el aprendizaje, la memoria, la lingüística o el pensamiento (p.e. McClelland y Elman, 1986; McClelland y Rumelhart, 1986; Rumelhart y Zipser, 1986).

Sin embargo, el conexionismo es algo más que un mero enfoque psicológico, se trata de un método computacional de una fuerte implantación en inteligencia artificial que debe considerarse como complementario de los métodos simbólicos tradicionales.

De hecho, en la actualidad el conexionismo ha alcanzado un desarrollo espectacular en la ciencia cognitiva tanto por la diversidad de campos donde encuentra aplicación como por la importancia que tiene entre la comunidad científica y la cantidad de investigación que genera (McCloskey, 1991).

Ahora bien, el resurgimiento actual del conexionismo no puede hacernos olvidar que se trata de una corriente teórica antigua que tiene alguno de sus antecedentes más remotos, entre otros, en los principios clásicos del asociacionismo. De ahí que en este trabajo se proponga comenzar con una exposición de los diferentes periodos que, en nuestra

opinión, han caracterizado la evolución histórica del conexionismo desde la formulación de las primeras ideas sobre las que se asientan los principios conexionistas hasta la actualidad en que la profusión de modelos conexionistas es muy llamativa.

Esquemáticamente, y para dar una idea de las etapas por las que se ha pasado hasta llegar al momento actual, hay que señalar cuatro fases claramente diferenciadas. Un momento inicial que engarza con la tradición asociacionista, y supone su conjunción con los conocimientos anatómicos que se alcanzan sobre la estructura neuronal del cerebro y su funcionamiento. Un segundo momento, con punto de partida a principio de los años cuarenta y, que se caracteriza por la aparición y el desarrollo de redes neuronales que simulan el funcionamiento del cerebro sirviéndose de redes de neuronas lógicas, reflejando un claro interés por la conexión entre la neurología y la teoría computacional. Esta segunda época acaba con cierta brusquedad en 1969 con la aparición del libro "Perceptrons" de Minsky y Papert, donde se recoge una dura crítica a las redes neuronales formales, abriéndose un periodo de olvido casi total de los sistemas formales lógicos. Pero a principios de los ochenta se inicia una cuarta etapa con el surgimiento de lo que se ha dado en llamar nuevo conexionismo, coincidiendo con la publicación del libro "Parallel Models of Associative Memory" escrito por Hinton y Anderson (1981).

En una segunda parte de este artículo analizaremos el impacto actual que el conexionismo ha tenido en la ciencia cognitiva, haciendo uso para ello de los índices cuantitativos que permite obtener el estudio de los repertorios bibliográficos 'Social Sciences Citation Index' y 'Sciences Citation Index'. Dicho análisis nos permitirá detectar, entre otras cuestiones, la importancia que las publicaciones sobre conexionismo han tenido a lo largo de la última década, cómo ha sido dicha evolución, qué autores son referenciados por la comunidad científica como de mayor impacto y qué obras han sido las más reconocidas en este campo.

## **Antecedentes Históricos Del Conexionismo.**

### *Primeros antecedentes: Asociacionismo y funcionamiento cerebral.*

El estudio de los antecedentes históricos sobre los que se asienta el conexionismo nos permite remontarnos hasta Aristóteles y sus ideas acerca de la formación de asociaciones como una de las claves que posteriormente va a ser retomada (Quinlan, 1991; Valentine, 1989). De las ideas expuestas por este autor pueden derivarse los dos grandes procedimientos que la tradición asociacionista ha considerado que existen para la formación de asociaciones: las asociaciones sucesivas, o asociaciones formadas por la contigüidad temporal existente entre dos acontecimientos sucesivos; y las asociaciones sincrónicas, o asociaciones formadas por la contigüidad espacial entre dos acontecimientos. Concretamente, William James (1890/1983), utiliza estos dos tipos de asociación para explicar el funcionamiento neuropsicológico y en su explicación pueden comenzar a verse antecedentes de los supuestos o características del conexionismo

actual. Para él, "cuando dos procesos cerebrales elementales se han activado juntos o en sucesión inmediata, uno de ellos, cuando vuelve a ocurrir, tiende a propagar su excitación al otro" (tomado de Valentine, 1989). La frecuencia de coocurrencia de los dos acontecimientos, la posibilidad de acontecimientos rivales, y la suma de activaciones provenientes de puntos diferentes del cerebro en un determinado punto, son principios, asimismo, recogidos por W. James y que ponen en evidencia la importancia de establecer conexiones entre asociacionismo y funcionamiento cerebral.

Con el comienzo del siglo veinte y los estudios de Santiago Ramón y Cajal sobre las neuronas y sus conexiones sinápticas se hace más patente el interés por equiparar asociación y sinapsis y en un plano más general psicología y neurología. Donald Hebb es un claro ejemplo de ese interés: "cuando un axón de una célula A está suficientemente cercano para excitar una célula B y repetida o persistentemente toma parte en excitarla, se produce un proceso de desarrollo o cambio metabólico en una o en ambas células de manera que la eficiencia de A, como una de las células que excita B, aumenta" (tomado de Quinlan, 1991). En esta regla general de Hebb se recogen algunas de sus ideas clave directamente relacionadas con el conexionismo actual. Para Hebb la estructura cerebral se desarrolla a medida que se expone al mundo estructurado. Mediante asociaciones simultáneas y secuenciales se establecen las conexiones celulares siendo la frecuencia y la coocurrencia claves en el proceso. Pero completa esta explicación introduciendo las ideas de reverberación y fases secuenciales. Hebb pensaba que para que los cambios sinápticos estructurales pudieran producirse era necesario que la actividad entre células tuviera una duración mínima, por lo que propuso la existencia de reverberación de la activación entre células pre y post sinápticas lo que alargaría su activación simultánea permitiendo así la aparición de cambios estructurales. La idea de fases secuenciales se refieren a la sucesiva puesta en marcha de conjuntos de células encargadas del análisis a distintos niveles de cualquier estímulo visual en su proceso de percepción.

No obstante, las aportaciones de Hebb no se han visto libres de críticas (Quinlan, 1991). Dichas críticas se centraron, sobre todo, en no reconocer la existencia de inhibición, por lo que todo el desarrollo neuronal se explicaba en términos de excitación. Además, las investigaciones actuales en neurofisiología han mostrado que para que se produzcan cambios entre células pre y post sinápticas no es necesario que ambas en su conjunto estén activadas, sino que es suficiente con que se den ciertos cambios electroquímicos localizados. Además, el modelo de Hebb, manteniendo las características anteriores, no fue capaz de superar su simulación mediante computadores. Sin embargo, las simulaciones fueron exitosas cuando a los supuestos de Hebb se añadieron los de la existencia de inhibición y el de que la activación de unidades próximas era más rápida que entre unidades más alejadas.

### Redes neuronales formales.

El trabajo de Hebb y algunos otros autores como Lashley (1950) o Milner (1957) se había centrado en la comprensión del funcionamiento psicológico en relación con el funcionamiento neuronal y como se ha visto más arriba supuso la aparición de numerosas ideas que forman parte del conexionismo actual. Pero estas aportaciones se ven complementadas por un trabajo realizado prácticamente de manera paralela con el anterior. Este desarrollo paralelo centra su atención en el funcionamiento cognitivo, pero buscando la conexión entre neurología y computación. El objetivo perseguido era explicar cómo realizan las neuronas operaciones lógicas básicas y cómo pueden realizarse procesos lógicos complejos por redes neuronales.

La aportación inicial más importante en este sentido es la de McCulloch y Pitts (1943) quienes definen una neurona formal en base a algunas de las características de una neurona, con el objeto de explicar cómo las interacciones entre estos elementos simples daban lugar a un pensamiento complejo. Esta neurona tenía una serie de características centrales para el conexionismo actual: las conexiones podían ser tanto excitadoras como inhibitoras; cada neurona tenía un umbral; la estructura de las interacciones entre las neuronas no cambiaba; la activación de una neurona era todo o nada. En su intento por comprender cómo las conexiones entre neuronas podían representar la lógica proposicional se centraron en la consideración de circuitos formados por unidades neuronales que se caracterizaban por tener un umbral variable y dos entradas (inputs) (ver figura 1). Un problema clave al que se enfrentaron McCulloch y Pitts en relación con estas unidades fue el de comprobar en qué medida podían computar el valor de verdad de cada una de las 16 funciones lógicas de dos proposiciones, problema clave en el desarrollo del conexionismo (Quinlan, 1991).

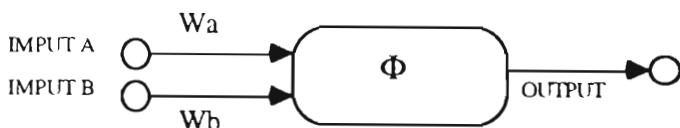
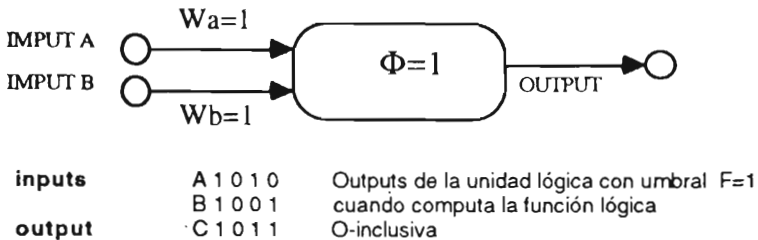


Figura 1: Unidad lógica binaria a umbral: Dos inputs con pesos  $W_a$  y  $W_b$  y umbral  $F$

Sin embargo el resultado de su trabajo mostró que las unidades tal y como estaban definidas (dos inputs y un umbral variable) sólo podían tratar 14 de las 16 funciones de las dos proposiciones. Cada una de estas funciones indica la relación entre el estado de las dos entradas que llegan a la unidad (ON;OFF) y el estado de salida de la unidad (ON;OFF). En la figura 2 aparecen un ejemplo de estas funciones. Las unidades no podían responder de manera adecuada a los requisitos de input-output de las funciones O exclusivo (EXOR) y su negación (O exclusivo: la neurona dará

como respuesta "verdad" cuando sólo el input A o sólo el input B estén en posición ON; Negación del O exclusivo: la unidad responde "verdad" cuando o los dos inputs están en posición ON o cuando los dos están en posición OFF).



**Figura 2:** Ejemplo de función lógica (O-inclusiva) que podía computar una unidad de McCulloch y Pitts.

El mismo McCulloch apuntó con posterioridad la posible solución a este problema. En su opinión las dos funciones no computables podrían serlo considerando redes de neuronas interconectadas. Esto implicaría que las funciones EXOR y su negación no serían funciones lógicas básicas a nivel neurofisiológico, sino que sería necesaria la participación de varias unidades primitivas para responder adecuadamente a las exigencias de input-output de ambas funciones.

A partir del trabajo de McCulloch y Pitts muchos autores se interesaron por el estudio de la estructura y funcionamiento de redes neuronales abstractas (formales). W. Taylor (1956) desarrolló una red neural para representar la memoria asociativa. Rosenblatt (1958) y su grupo de trabajo a finales de los cincuenta y principio de los sesenta centró su atención en el estudio de redes denominadas perceptrons por su capacidad para aprender a reconocer patrones visuales. También a principios de los sesenta B. Widrow y M.E. Hoff (1960) diseñan una red parecida a los perceptrones, denominada adaline (adaptive linear neuron), que aprendía mediante cambios en los pesos de las conexiones entre unidades proporcionales a la diferencia existente entre el patrón de activación buscado en la red y el mostrado por ésta (Valentine, 1989). Este procedimiento se denomina de Widrow-Holff o regla delta, actualmente una de las reglas de aprendizaje utilizadas por el conexionismo.

La importancia del trabajo del grupo de Rosenblatt sobre los perceptrones merece una explicación más detallada. Este grupo diseñó unas redes de neuronas formales denominadas perceptrones con el objetivo de que fueran capaces de reconocer diferentes patrones visuales. La estructura de este tipo de redes constaba de una capa de unidades sensoriales a las que llega el input desde el exterior y que vendría a ser la retina del perceptron, una capa de unidades de asociación conectadas con

las de respuesta, y una capa de unidades de respuesta encargadas de emitir las respuestas. Una de las características más importantes de esa red era que los pesos de las conexiones entre las unidades sensoriales y de asociación permanecía fijo, mientras que los pesos de las conexiones entre las unidades de asociación y las de respuesta podían variar, por lo que a este tipo de red también se le denomina como perceptron simple con una única capa de pesos modificables (Quinlan, 1991). El proceso de aprendizaje en el perceptron se producía comparando su output con el deseado, en la medida que existía desacuerdo se producía un ajuste de los umbrales de las unidades de asociación y de respuesta y de los pesos de las conexiones existentes entre las unidades de la red.

#### *La crítica de Minsky y Papert.*

Pese al gran interés por el estudio de redes formales durante los sesenta, toda la investigación realizada sufre un jarro de agua fría con la publicación en 1969 de la obra de Minsky y Papert "Perceptrons", propiciando el auge del estudio de la Inteligencia Artificial durante los años setenta en detrimento del estudio de las redes neuronales (Valentine, 1989). El trabajo de Minsky y Papert es un estudio minucioso de las capacidades teóricas y prácticas de los perceptrones de una capa para realizar efectivamente el reconocimiento de patrones. Los resultados de su análisis fueron negativos: incapacidad de los perceptrones para reconocer patrones independientemente de si los estímulos están girados respecto a su posición correcta; incapacidad para computar las funciones lógicas EXOR y su negación; o el problema de la paridad o incapacidad para distinguir si el número de puntos iluminados en la retina era par o impar.

Las conclusiones sobre el estudio de los perceptrones de una capa llevaron, por un lado a Minsky y Papert a generalizarlas a perceptrones multi-capas, y por otro a la comunidad científica a aceptarlas y a abandonar el estudio de redes neuronales durante la década de los setenta.

#### *El nuevo conexionismo.*

No es hasta comienzos de los ochenta cuando resurge el interés por el conexionismo y cuando comienzan a superarse las limitaciones que presentaban los perceptrones simples. El análisis de Minsky y Papert puso de manifiesto importantes deficiencias en los perceptrones de una capa, lo que condujo al abandono de su estudio y a dirigir el interés de los investigadores hacia otros campos como la Inteligencia Artificial, aunque posiblemente debido a que en aquel momento no se conocían técnicas para entrenar redes multicapa (Wasserman, 1989).

Para Valentine (1989) el nacimiento del neo-conexionismo tiene su punto de partida en el libro de G. Hinton y J. Anderson (1981) "Parallel Models of Associative Memory". A partir de ese momento el desarrollo del conexionismo ha sido fulgurante llegando a considerarse, por algunos autores, que ha supuesto un cambio paradigmático en la psicología (Schneider, 1987).

Los hechos más relevantes en estos últimos diez años tienen que ver con la suposición de que puede almacenarse información en configuraciones dinámicamente estables (Hopfield, 1982). La aparición de las máquinas de Boltzmann, que son redes que incluyen unidades ocultas y utilizan un procedimiento denominado "simulated annealing" para alcanzar configuraciones estables en las unidades (Hinton y Sejnowski, 1983). También aparecen modelos multicapa que utilizan el algoritmo de propagación hacia atrás (back-propagation) para ajustar los cambios en los pesos de las unidades (Rumelhart, Hinton y Williams, 1986), resolviendo los problemas puestos de manifiesto por Minsky y Papert con anterioridad.

Por último, en 1986 aparecen los dos volúmenes de McClelland y Rumelhart "Parallel Distributed Processing" (PDP) donde se recogen distintos tipos de modelos conexionistas, sus estructuras y algoritmos de aprendizaje. Modelos que constituyen la base de la investigación actual sobre conexionismo, tanto en Psicología como en otras disciplinas, y que pueden considerarse como los de mayor influencia en este campo.

### **El impacto de conexionismo.**

El análisis histórico realizado en la primera parte de este trabajo va a completarse con un estudio sobre el impacto actual del conexionismo en la ciencia cognitiva. Con ello pretendemos obtener una idea precisa de la importancia que desde el inicio de los años ochenta ha alcanzado el conexionismo tanto en Psicología como en otras ciencias.

#### *Método.*

La cuantificación objetiva de la importancia del conexionismo desde el año 1980 hasta el año 1991 se ha realizado acudiendo al estudio de dos de las publicaciones del ISI, el SSCI (Social Science Citation Index) y el SCI (Science Citation Index). Estos dos repertorios bibliográficos nos permiten analizar el contenido de un gran número de revistas de diferentes disciplinas, al vaciar los trabajos en ellas publicados desde el año 1975.

De esta manera es posible conocer el número de artículos aparecidos en un determinado año sobre conexionismo o redes neuronales y el número de citas que, también en un determinado año, recibe un autor, por ejemplo J. L. McClelland o D. E. Rumelhart y concretamente cuáles de sus trabajos son los más citados, constituyendo esto un indicador de su impacto.

Para estimar la importancia del conexionismo en la ciencia cognitiva se ha atendido a tres aspectos: a) Número de artículos publicados cada año que hacían referencia a los términos: conexionismo, conexionista o redes neuronales, entradas que pensamos que delimitan con bastante precisión la temática que nos interesa. ; b) Número de citas que cada año han recibido 38 autores que hemos considerado como investigadores clave en el campo del conexionismo (ver tabla 1); c) Número de citas que cada año han recibido 9 de los 38 investigadores anteriores (ver tabla 1), pero en los que se ha estudiado de manera pormenorizada las citas que ha recibido cada uno de

sus trabajos. La selección de estos nueve autores se ha basado en que han realizado aportaciones de reconocida relevancia en la investigación posterior, tanto en el desarrollo de los aspectos matemáticos o de computación básicos para el conexionismo actual así como en su aplicación a la Psicología.

### *Resultados.*

Los gráficos 1 y 2 representan, respectivamente, el número de artículos publicados anualmente, desde el año 1980 hasta el año 1991 en el SSCI y el SCI, sobre conexionismo, modelos conexionistas o redes neuronales, términos utilizados prácticamente como sinónimos en la literatura. El primer gráfico refleja los artículos que sobre conexionismo se recogen en publicaciones del ámbito de las ciencias sociales. Pueden señalarse dos aspectos destacados. El primero es la aparición relativamente reciente de artículos sobre conexionismo, obsérvese que en el año 1980 no hay ninguno, y que posteriormente se produce un aumento muy lento del número de trabajos hasta el año 1985 en que el crecimiento comienza a ser más destacado. El segundo punto relevante, es el elevado número de artículos en el año 1988 donde se produce una ruptura con el crecimiento progresivo que muestra todo el gráfico. Posiblemente el año 1988 destaca por la reacción que origina entre los investigadores la publicación en 1986 de los dos volúmenes de McClelland, Rumelhart titulados "Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition". Estos dos volúmenes se convierten con su amplia difusión en el punto de referencia para un gran número de investigadores que se lanzan a discutir distintos aspectos en redes neuronales.

Los datos que refleja el segundo gráfico son los aportados por el SCI, que incluye publicaciones en ciencias como la física, la neurología o la computación de gran relevancia para la temática que estamos analizando. El primer aspecto que destaca en este gráfico es el mayor número de trabajos publicados sobre conexionismo en el SCI frente a los que aparecen en el SSCI. Como en el gráfico primero se muestra una tendencia similar en el número de artículos publicados sobre conexionismo, observándose escasas publicaciones a comienzo de los ochenta y un crecimiento continuado hacia el final de los 80 y comienzo de los 90, sin embargo este crecimiento es mucho más acelerado. Parece como si el conexionismo hubiera tardado más en llegar a estas ciencias pero ha sido recibido con un mayor interés. Esta circunstancia puede corroborarse además si se tiene en cuenta que las primeras conferencias internacionales que tuvieron lugar hacia finales de los ochenta sobre estos temas fueron multitudinarias, como la primera conferencia internacional sobre redes neuronales organizada por la Asociación Internacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) celebrada en 1987 y con más de 1800 asistentes, o la primera conferencia de la sociedad internacional de redes neuronales celebrada en 1988, que han tenido continuidad desde entonces. Las publicaciones periódicas que han surgido desde finales de los ochenta también son reflejo de ese crecimiento acelerado; entre otras, "Neural Networks", "Journal of Neural Network Computing" o el "International Journal of Neural Networks".



Además, tanto los nombres que se han dado a las conferencias internacionales como a las publicaciones especializadas que han surgido, explican la sustitución progresiva que ha tenido lugar del término "conexionismo" por el término "redes neuronales", que es claramente visible en el gráfico segundo.

En la tabla 2 aparecen ordenados los autores atendiendo al número de citas totales recibidas en los 12 años analizados, aunque también se incluye el número de citas de cada autor en cada año.

### *Discusión.*

#### **- Autores clásicos.**

En la parte inicial de este trabajo, donde se hacía un repaso histórico a lo que ha sido el desarrollo del conexionismo, se indicaron algunos autores cuyas obras supusieron, o bien avances claros en lo que posteriormente sería el conexionismo (p.e.: F. Rosenblatt), o críticas con importantes repercusiones (p.e.: M. Minsky). Nos ha parecido interesante conocer la vigencia en los últimos años de estos autores que podríamos calificar como clásicos y que esta revisión permite refrendar como tales.

Siguiendo un cierto orden cronológico debería comenzarse atendiendo a la obra de D.O. Hebb. En la tabla 2 puede comprobarse que este autor mantiene un número de citas relativamente constante a lo largo de los años y es además el 8º autor más citado entre los considerados en el estudio. Sin embargo esa posición debe pensarse que es aún más significativa, puesto que algunos de los trabajos de autores que aparecen como de los más citados no están relacionados con el conexionismo, como es el caso de J.R. Anderson o G.H. Bower. Además, hay que reconocer que su vigencia no se debe únicamente al resurgimiento del conexionismo, puesto que entre 1956 y 1965 su obra "Drives and the CNS (conceptual nervous system)" es uno de los 25 trabajos más citados (Garfield, 1989).

Sin llegar al impacto de Hebb, W.S. McCulloch es otro autor clásico que sigue vigente con un número de referencias relativamente elevado y constante a lo largo de los últimos años. Y la misma reflexión cabría hacer para F. Rosenblatt, continuador del trabajo de McCulloch como se señalaba en la introducción y que encabezó el grupo de investigadores que desarrollaron los perceptrones.

M. Minsky y S. Papert, que con su crítica sobre los perceptrones adentraron al conexionismo en una periodo de aletargamiento también mantienen un número de referencias constante a lo largo de los años y su obra "Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry" ha sido reeditada en 1988, lo que debe considerarse como claro ejemplo de la importancia de estos dos autores que la editaron por primera vez en 1969.

En resumen, puede considerarse que estos autores, clásicos en la historia del conexionismo, siguen despertando un interés constante pese al

transcurso de los años, posiblemente por la importancia de las aportaciones teóricas que hicieron en su momento. Junto a éstos también podrían destacarse otros autores que siguen suscitando un interés que podría atribuirse, más que a sus aportaciones teóricas globales, a haber introducido procedimientos técnicos o de cálculo que han permitido el desarrollo del conexionismo actual. Es el caso de B. Widrow y M.E. Hoff que introdujeron lo que actualmente se denomina "regla delta" (1960).

#### **- Impacto por autores.**

En la tabla 2 aparecen ordenados los autores que hemos considerado en el estudio atendiendo a la suma total de referencias que reciben en los doce años que abarca el estudio. Sin embargo no debe considerarse estrictamente que el orden en el que aparecen indica su importancia absoluta en el campo del conexionismo. Esto se debe a que para algunos autores muchas de las referencias que contribuyen a su total, son citas de sus artículos o libros que no tienen relación alguna con conexionismo, redes neuronales o procesamiento distribuido. Ese puede ser el caso de W. Schneider o el de D.E. Rumelhart. Por ejemplo, para éste último autor, si bien la obra de que es coautor "Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition" (1986) ha sido clave en el desarrollo del conexionismo actual, otros de sus trabajos, también muy citados no guardan relación con estos temas.

Pero en conjunto la tabla 2 es un buen reflejo de cuál ha sido en los últimos años la importancia de los autores que a priori seleccionamos como los más representativos en el campo del conexionismo.

#### **- Las obras clave.**

Como ya se indicó más arriba, para nueve autores, se ha realizado un recuento pormenorizado del número de citas que han recibido en los doce años estudiados cada uno de sus trabajos. Este análisis minucioso permite descubrir cuáles de sus obras han tenido un mayor impacto y comparar entre sí obras de distintos autores, centrándonos exclusivamente en aquellas de carácter conexionista.

En el siguiente cuadro aparecen las 10 obras más citadas dentro del grupo de nueve autores analizado de mayor a menor número de citas recibidas:

- McClelland, J.L., Rumelhart, D.E. and the PDP Research Grup. (1986). Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition. Vol.1: Foundations. Vol.2: Psychological and biological models. Cambridge, MA. The MIT Press.
- Minsky, M. (1975). A framework for representing knowledge. In P.H. Winston (Ed.), *The psychology of computer vision* (p.p.211-277). New York: McGraw-Hill.
- Kohonen, T. (1984; segunda edición: 1988). *Self-Organization and associative memory*. Series in information sciences. Vol.8. Berlin: Springer Verlag.
- Minsky, M. & Papert, S.A. (1969; expanded edition: 1988). *Perceptrons: An introduction to computational geometry*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kohonen, T. (1977). *Associative memory: A system-theoretical approach*. Berlin, Federal Republic of Germany: Springer-Verlag.
- Hinton, G.E. & Anderson, J.A. (Eds.)(1981). *Parallel models of associative memory*. Hillsdale, N.J.: LEA.
- Anderson, J.A. (1972). A simple neural network generating an interactive memory. *Mathematical Biosciences*, 14, 197 - 220.
- Grossberg, S. (1976). Adaptive pattern classification and universal recoding. I: Parallel development and coding of neural feature detectors. *Biological Cybernetics*, 23, 187-202.
- Hinton, G.E., McClelland, J.L. & Rumelhart, D.E. (1986). Distributed representations. In McClelland, J.L., Rumelhart, D.E. and the PDP Research Grup. (1986). *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition*. Vol.1: Foundations. Cambridge, MA. The MIT Press.
- Anderson, J.A., Silverstein, J.W. & Jones, R.S.( 1977). Distinctive features, categorical perception, and probability learning: Some applications of a neural model. *Psychological Review*, 84, 197-220.

De las obras que aparecen en la tabla anterior, resulta de interés realizar algunos comentarios.

Como puede observarse los dos volúmenes del libro de McClelland y Rumelhart son los más citados y tal como se señalaba en la introducción histórica, se comprueba que esta obra supone el punto de partida del apogeo actual del nuevo conexionismo a mediados de los 80. Estos dos volúmenes incluyen capítulos escritos por otros autores que no son únicamente McClelland y Rumelhart, y precisamente uno de esos capítulos escrito por Hinton, se sitúa, asimismo, entre los diez de mayor impacto.

El segundo trabajo más citado es el capítulo de Minsky (1975) "A frame work for representing knowledge", que recoge un análisis de problemas lógicos de representación. Otro trabajo de este mismo autor, su obra "Perceptrons" (1969), escrita junto a Papert, también se encuentra entre los más citados, lo que confirma el impacto de esta crítica hacia los perceptrones sigue teniendo aún después del resurgimiento del conexionismo gracias a la superación de las limitaciones apuntadas en el libro.

Dos trabajos de Kohonen se encuentran entre los más citados. Kohonen se dedica desde los años setenta al estudio del aprendizaje adaptativo, a las memorias asociativas y al denominado principio del aprendizaje competitivo.

Por último, hay que señalar que la obra que se ha considerado como clave en el resurgimiento del conexionismo a principios de los años 80, "Parallel Models of Associative Memory" (Hinton & Anderson, 1981), tal y como se señalaba en la introducción, sigue siendo una obra que continúa tomándose como referencia en este campo, como queda reflejado por la posición que ocupa en el grupo de trabajos de impacto más significativo.

## REFERENCIAS

- Garfield, E. (1989). Psychology research, 1986-1990: A citation prespective on the highest impact papers, institutions, and authors. *Current contents*, 41, 5-15.
- Hinton G.E. & Sejnowski, T.J. (1983). Analysing co-operative computation. *Paper presented to the 5th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Rochester NY.
- Hinton, G.E. & Anderson, J.A. (Eds.)(1981). *Parallel models of associative memory*. Hillsdale, N.J.: LEA.
- Hopfield, J.J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 79, 2554-2558.
- McClelland, J.L. y Elman, J.L. (1986). Interactive processes in speech perception: The TRACE model. En J.L. McClelland y D.E. Rumelhart (eds.), *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 2 Cambridge, Mass: The MIT Press.
- McClelland, J.L. y Rumelhart, D.E. (1986), *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 1 y 2. Cambridge, Mass: The MIT Press
- McCloskey, M. (1991). Networks and theories: The place of connectionism incognitive escience. *Psychological Science*, 2, 387-395.
- McCulloch, W.S. & Pitts, W.H. (1943/1965). A logical calculus of the ideas immanet in the nervous activity. In W.S. McCulloch (Ed.), *Embodiments of mind*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Milner, P.M. (1957). The cell assembly: Mark II. *Psychological Review*, 64, 242-252.
- Minsky, M. & Papert, S.A. (1969; expanded edition: 1988). *Perceptrons: An introduction to computational geometry*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Quinlan, P. (1991). *Connectionism & Psychology. A psychological perspective on new connectionist research*.
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65, 386-408.
- Rumelhart, D.E. y Zipser, D. (1986). Feature discovery by competitive learning. En J.L. McClelland y D.E. Rumelhart (eds.), *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 1 Cambridge, Mass: The MIT Press.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. & Williams, R.J. (1986). Learning internal representations by error propagation. In *Parallel distributed processing (Vol. 1)*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Schneider, W. (1987). Connectionism: It is a paradigm shift for psychology?. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 19, 73-83.
- Valentine, E.R. (1989). Neural nets: From Hartley and Hebb to Hinton. *Journal of Mathematical Psychology*, 33, 348-357.
- Wasserman, P.D. (1989). *Neural Computing: Theory and practice*. VNR. New York.
- Widrow, G. & Hoff, M.E. (1960). Adaptive switching circuits. *Institute of RadioEngineers, Western Electronic Show and Convention, Convention Record, Part 4*, 96-104.

* ANDERSON, J. A.	* HINTON, G. E.	PITTS, W.
* ANDERSON, J. R.	HOFF, M. E.	PYLYSHYN, Z.
BOLTZMANN, L.	HOPFIELD, J.	RATCLIFF, R.
BOWER, G. H.	* KOHONEN, T.	ROSENBLATT, F.
BURR, D. J.	MARR, D.	* RUMELHART, D. E.
CARBONELL, J.	MASSARO, D. W.	SCHNEIDER, W.
CHURCHLAND, P. S.	* MCCLELLAND, J. L.	SEIDENBERG, M. S.
ESTES, W. K.	MCCULLOCH, W.S.	* SEJNOWSKI, T.
FELDMAN, J. A.	* MINSKY, M.	SIMON, H.
FODOR, J.	MURDOCK, B. B.	SMOLENSKY, P.
* GROSSBERG, S.	NEWELL, A.	TOURETZKY, D. S.
HANSON, S. J.	NORMAN, D. A.	WIDROW, B.
HEBB, D.O.	PAPERT, S.	

Tabla 1.: Listado de autores para los que se ha estudiado su impacto. En los que aparece (\*) también se ha analizado el impacto individual de sus trabajos referidos o relacionados con el conexionismo.

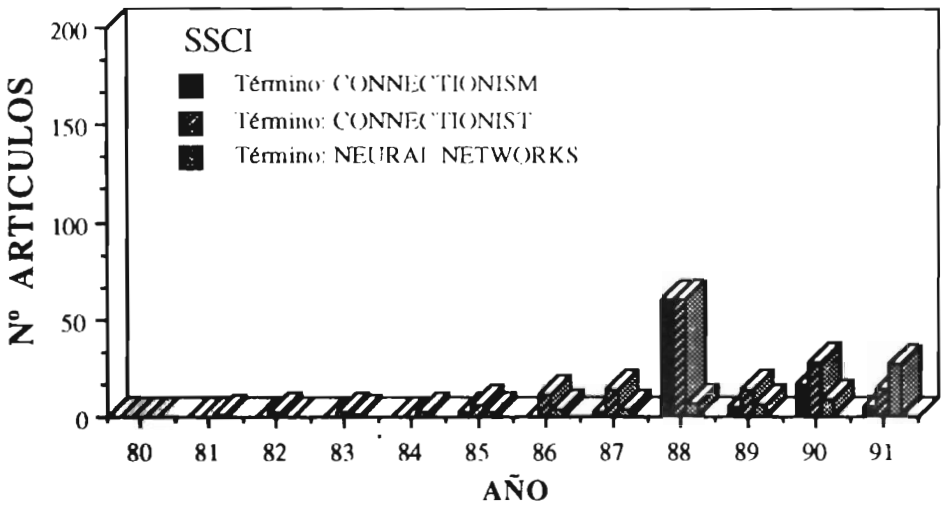


Gráfico 1: Nº de trabajos sobre conexionismo y redes neuronales recogidos por años en el SSCI

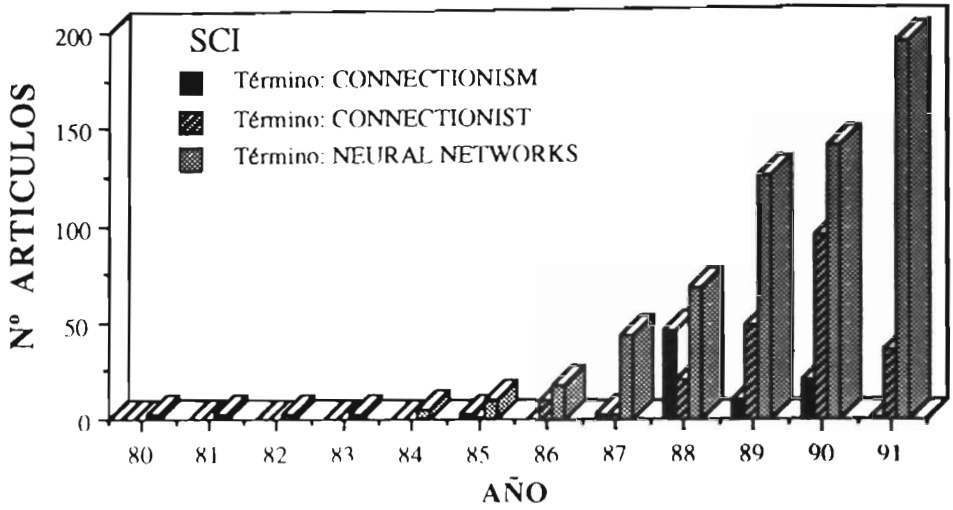


Gráfico 2: Nº de trabajos sobre conexionismo y redes neuronales recogidos por años en el SCI.

AUTORES	AÑOS												TOTAL
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	
ANDERSON, J. R.	251	0	288	270	347	361	323	403	418	387	450	348	3846
SCHNEIDER, W.	208	241	235	242	284	359	308	260	388	342	353	332	3552
MARR, D.	160	209	165	256	347	369	235	309	343	393	408	354	3548
RUMELHART, D. E.	161	263	250	229	202	222	208	297	506	***	583	476	3397
BOWER, G. H.	190	282	230	260	256	314	307	262	266	166	132	175	2840
SIMON, H.	180	260	239	253	215	299	287	286	240	149	114	146	2668
NEWELL, A.	222	225	218	188	203	205	197	272	260	211	241	171	2613
HEBB, D.O.	228	256	186	154	176	150	160	167	238	228	205	209	2357
NORMAN, D. A.	194	266	220	171	204	144	174	181	190	127	144	138	2153
WIDROW, B.	96	168	110	165	123	117	155	202	172	194	247	243	1992
GROSSBERG, S.	69	18	56	52	144	143	95	314	238	235	211	241	1816
ESTES, W. K.	222	235	210	139	128	140	103	137	131	70	86	99	1700
MCCLELLAND, J. L.	29	80	98	62	84	115	137	186	254	***	304	222	1571
MINSKY, M.	92	130	101	96	120	137	174	151	180	163	***	182	1526
KOHONEN, T.	22	17	32	35	53	41	89	136	143	217	270	209	1264
ANDERSON, J. A.	43	71	120	84	113	112	103	135	117	96	105	87	1186
MASSARO, D. W.	97	137	116	103	107	68	104	64	77	30	119	71	1093
PYLYSHYN, Z.	81	97	91	70	38	105	59	85	110	74	80	53	943
MURDOCK, B. B.	106	93	95	65	81	73	86	68	76	48	45	42	878
HINTON, G. E.	2	5	10	16	29	51	46	90	99	119	149	102	718
RATCLIFF, R.	29	43	65	43	46	47	73	43	91	79	65	71	695
SEIDENBERG, M. S.	5	14	9	14	19	61	71	104	93	79	96	79	644
PAPERT, S.	18	20	38	54	65	71	89	87	87	48	2	37	616
BOLTZMANN, L.	47	52	42	60	47	46	49	63	36	29	49	53	573
FELDMAN, J. A.	14	20	18	40	33	49	46	49	70	54	51	29	473
FODOR, J.	38	37	39	35	39	80	55	68	51	7	6	10	465
MCCULLOCH, W.S.	28	22	22	18	25	16	27	30	58	72	59	59	436
ROSENBLATT, F.	18	7	20	8	15	21	17	31	54	76	77	72	416
SEJNOWSKI, T.	1	1	21	3	14	14	18	40	22	66	96	88	384
CHURCHLAND, P. S.	4	6	9	8	5	23	10	22	38	25	42	0	234
CARBONELL, J.	12	15	10	9	9	16	11	27	23	21	19	33	205
SMOLENSKY, P.	0	0	0	0	0	1	4	6	32	17	87	28	175
TOURETZKY, D. S.	0	0	0	0	1	3	4	14	25	13	58	24	142
BURR, D. J.	5	7	3	14	5	16	9	8	10	16	24	22	139
PITTS, W.	8	6	9	9	10	5	11	10	9	10	3	10	100
HANSON, S. J.	1	1	1	2	7	11	7	6	11	5	13	7	72
HOFF, M. E.	9	13	3	1	1	4	0	0	1	0	1	1	34
HOPFIELD, J.	1	0	0	2	2	4	1	1	6	4	2	8	31

Tabla 2: Nº de citas por autores y años ordenados de mayor a menor nº de citas recibidas.