

Contribuciones de la neurociencia al diagnóstico y tratamiento educativo de la dislexia del desarrollo

C. López-Escribano

CONTRIBUCIONES DE LA NEUROCIENCIA AL DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO EDUCATIVO DE LA DISLEXIA DEL DESARROLLO

Resumen. *Objetivo. Examinar las contribuciones y el avance entre psicología cognitiva, neurociencia y educación. Desarrollo. Se presenta una revisión de los modelos actuales de dislexia y se analiza la relación de estos modelos con los estudios de neuroimagen y de intervención educativa. El primer modelo presentado es el del 'déficit fonológico', que es el más ampliamente demostrado y aceptado en la actualidad. Las personas con dislexia presentan dificultades en tareas que implican segmentación fonológica del lenguaje. Los estudios de neuroimagen muestran, también, una activación cerebral atípica en disléxicos durante tareas que requieren procesamiento fonológico. Los programas de intervención de tipo fonológico han mostrado ser efectivos tanto en relación con la conducta como neurofisiológicamente. Dada la complejidad del proceso lector, se investigan otros modelos en la actualidad. Aunque el modelo del déficit en el 'procesamiento temporal' es más controvertido, y no tan ampliamente aceptado, comparado con el modelo anterior, algunos trabajos muestran evidencia tanto conductual como neurofisiológica de que existen diferencias en el procesamiento visual y auditivo entre sujetos disléxicos y controles. Diferentes aproximaciones educativas para remediar este déficit de procesamiento temporal se han probado con éxito en niños disléxicos. Finalmente se examina el estado actual entre neurociencia y educación en el área de las dificultades de lectura y se analizan implicaciones futuras relacionadas con los diferentes enfoques y métodos utilizados en la investigación actual. Conclusiones. A pesar de que todavía queda un largo camino para comprender las causas de los déficit lectores, la colaboración entre la neurociencia, la psicología y la educación contribuye a una mejor comprensión de la psicología de la lectura, de su diagnóstico y de su intervención. [REV NEUROL 2007; 44: 173-80]*

Palabras clave. *Dislexia del desarrollo. Intervención. Neuroimagen. Procesamiento fonológico. Procesamiento temporal auditivo. Procesamiento temporal visual.*

INTRODUCCIÓN

La neurociencia, que une neurología, psicología y biología en el estudio de cómo aprende y recuerda el cerebro, ha fascinado desde hace tiempo a psicólogos y educadores, que han perseguido revolucionar la práctica de la enseñanza con resultados de la investigación neurocientífica. Guiados por el entusiasmo que despiertan los últimos descubrimientos sobre el cerebro, algunos políticos y profesionales de la educación han llegado, a veces, a conclusiones prematuras, como, por ejemplo, pensar que se pueden diseñar métodos y contenidos educativos basados en la proliferación y la eliminación sináptica en los niños [1]. Sería un error prometer o esperar demasiado pronto. Si bien ya se dispone de algunas perspectivas y resultados valiosos, pasarán años antes de que los descubrimientos de la neurociencia se puedan aplicar con seguridad a la educación. Sin embargo, la colaboración entre educadores y neurocientíficos puede contribuir a una mejor comprensión del proceso de enseñanza-aprendizaje; en concreto, el área del desarrollo de la lectura ofrece un potencial considerable para este tipo de colaboración [2,3].

Este artículo presenta un resumen de los principales modelos contemporáneos de dislexia, que han servido de apoyo a los estudios de neuroimagen. Estos modelos han tenido y tienen implicaciones importantes para los neurocientíficos a la hora de

diseñar sus estudios y elegir tareas y sujetos. A su vez, los resultados de los trabajos en neurociencia aportan datos que permiten refinar los modelos sobre lectura y dislexia creando nuevas conceptualizaciones, más precisas, más flexibles y con mayor detalle, que contribuyen a reflexionar y mejorar el diagnóstico y la intervención educativa en la lectura.

Se finaliza el artículo con un enfoque sobre la colaboración y el progreso actual entre neurociencia y educación en el área de las dificultades lectoras y se discuten implicaciones para investigaciones futuras.

MODELO DEL DÉFICIT FONOLÓGICO

A lo largo de la evolución de la historia de la dislexia del desarrollo ha existido un gran debate sobre la causa y la definición de este trastorno del aprendizaje. Las tendencias actuales sugieren que este trastorno tiene bases neurológicas y genéticas y que, cognitivamente, está causado por un fallo en el procesamiento fonológico de la información. Sin embargo, el debate continúa abierto en la actualidad sobre si este 'déficit fonológico' es el único o existen otros posibles déficit cognitivos que contribuyen también a los problemas de lectura en la dislexia. Dada la complejidad del proceso lector, en la práctica resulta muy limitado definir la dislexia del desarrollo como un trastorno específico y unidimensional que puede diagnosticarse con exactitud y fiabilidad. Está claro que los niños que tienen problemas para aprender a leer presentan una lista de dificultades en los requisitos asociados con la lectura; estas dificultades deben provenir de causas diferentes. Es evidente que la dislexia no es una entidad discreta sino que se presenta en una gradación continua. Sin embargo, este hecho no hace que la definición específica de dislexia como déficit fonológico sea científicamente innecesaria [4].

Aceptado tras revisión externa: 21.11.06.

Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Educación. Departamento de Psicología Evolutiva y de la Educación. Madrid, España.

Correspondencia: Dra. Carmen López-Escribano. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Educación. Departamento de Psicología Evolutiva y de la Educación. Rector Royo Villanova, s/n. Despacho 4.209. E-28040 Madrid. Fax: +34 913 946 134. E-mail: carmenle@edu.ucm.es

© 2007, REVISTA DE NEUROLOGÍA

En concreto, en los estudios de neuroimagen, la definición de dislexia utilizada tendrá implicaciones importantes para seleccionar la muestra y para identificar las regiones neurológicas de interés. La selección de muestras sin características específicas o poco diferenciadas hará que no sea posible extraer conclusiones con implicaciones útiles ni válidas para la educación.

La investigación en los últimos diez años se ha centrado intensivamente en el modelo del déficit fonológico: la habilidad de transformar el discurso en códigos lingüísticos, manipular estos códigos en la memoria de trabajo, almacenarlos y recuperarlos de la memoria a largo plazo [5-7].

Actualmente, se ha demostrado ampliamente que los niños disléxicos muestran déficit en varios aspectos del procesamiento fonológico. Tienen dificultades en segmentar el lenguaje fonológicamente en tareas que implican síntesis, aislamiento, segmentación y omisión de fonemas [8,9]; tienen dificultades al nombrar [10,11] y utilizan códigos de memoria a corto plazo ineficientes [12,13]. Este tipo de dificultades ha llevado a muchos investigadores a localizar el *locus* próximo de la dislexia en el reconocimiento de palabras.

El niño que comienza a leer debe haber desarrollado la conciencia fonológica para poder aprender el principio alfabético, es decir, la correspondencia grafema-fonema. El aprendizaje de las reglas de correspondencia grafema-fonema es la habilidad más básica para analizar los sonidos de las palabras. Una carencia o defecto en el procesamiento fonológico perturba la decodificación e impide, por tanto, la identificación de las palabras [14].

El déficit fonológico se ha demostrado en diferentes laboratorios utilizando una amplia variedad de tareas y en diferentes lenguas. En inglés se ha mostrado la importancia del procesamiento fonológico para la lectura [15,16]. Trabajos similares se han realizado en español [17], en francés [18] y en italiano [19]. Por tanto, la evidencia de un rol causal es consistente a través de varios estudios en diferentes lenguas alfabéticas.

En la actualidad, el advenimiento de técnicas de neuroimagen ha permitido realizar un gran número de estudios sobre la anatomía y la actividad funcional del cerebro durante tareas de lectura que requieren procesamiento fonológico.

Las técnicas de neuroimagen más utilizadas en estos estudios han sido la tomografía por emisión de positrones (PET), la resonancia magnética (RM), la magnetoencefalografía (MEG) y los potenciales evocados cerebrales [20]. Estas técnicas varían en el grado de resolución espacial, el grado de resolución temporal y la invasividad. Dada la naturaleza complementaria de sus ventajas e inconvenientes, cuando se utilizan conjuntamente pueden proporcionar una imagen clara de la secuencia temporal y espacial de los patrones de activación cerebral durante la lectura [21].

Debido al lugar central que ocupa el déficit fonológico en las conceptualizaciones actuales de dislexia, la mayoría de los estudios de neuroimagen realizados con disléxicos adopta un criterio de selección para identificar a individuos con déficit en el procesamiento fonológico.

Probablemente, como no todos los disléxicos manifiestan problemas en el procesamiento fonológico [22], las muestras obtenidas utilizando este criterio de selección representarán solamente a una parte de la población que se ha diagnosticado con dislexia. A pesar de ello, los estudios de neuroimagen han aportado conclusiones interesantes sobre el funcionamiento de los circuitos lectores en personas con déficit fonológico.

Gran parte de los estudios de neuroimagen realizados hasta la fecha muestran resultados muy similares sobre el perfil neu-

ropsicológico en adultos con dislexia del desarrollo. Específicamente, durante tareas que requieren procesamiento fonológico, los adultos disléxicos muestran una disfunción cerebral en regiones perisilvianas del hemisferio izquierdo. Esta disfunción se caracteriza por la ausencia o la reducción de activación en esta región, que se activa consistentemente en sujetos controles, sin problemas de lectura, al realizar las mismas tareas. La investigación también sugiere un incremento de activación, quizás compensatoria, en esta misma región en el hemisferio derecho y en áreas del córtex prefrontal en sujetos disléxicos [23-27].

Los primeros estudios de neuroimagen examinaron patrones de activación cerebral durante tareas de procesamiento fonológico en adultos, ya que las técnicas de neuroimagen utilizadas (PET) se consideraban poco seguras en niños. En la actualidad existen otras técnicas menos invasivas y más seguras que han permitido realizar estudios de neuroimagen con niños disléxicos [28].

A pesar de la variación en las técnicas de neuroimagen utilizadas, en la lengua nativa, en el rango de edad de los participantes y en las tareas utilizadas, los estudios realizados con niños disléxicos hasta la fecha [29-36] muestran resultados muy similares sobre el patrón de activación cerebral que los caracteriza. Todos ellos presentan la misma disfunción en el hemisferio posterior izquierdo que caracteriza también a los adultos disléxicos, pero mientras que la investigación con adultos disléxicos sugiere un perfil de incremento de activación en regiones posteriores del hemisferio derecho y regiones frontales bilaterales, los niños disléxicos sólo muestran este incremento de activación en regiones posteriores del hemisferio derecho. La activación en regiones frontales probablemente surja a consecuencia del desarrollo de un mecanismo compensatorio en los lectores disléxicos adultos [28].

Desde el modelo del déficit fonológico se han propuesto programas de intervención educativa cuyo objetivo es la estimulación de la conciencia fonológica.

Normalmente, los programas destinados a la mejora de la conciencia fonológica comienzan examinando las relaciones entre el lenguaje escrito y el lenguaje hablado. Las técnicas son similares, en este punto, a ciertos ejercicios y terapias del lenguaje. La primera etapa es hacer que el niño tome conciencia de su propio sistema sonoro y hablado: enseñar al niño a escuchar y a prestar atención, a observar al hablante cuidadosamente, especialmente sus labios y su lengua, así como a captar las señales no verbales (Fig. 1).

Estos métodos comienzan con el estudio del sonido desde el fonema, unidad menor, y gradualmente avanzan a unidades mayores como la sílaba, la palabra y, finalmente, la frase y el texto siempre en orden de dificultad creciente. Son programas que generalmente se caracterizan por ser estructurados, secuenciales, cumulativos, sistemáticos y multisensoriales. Un amplio número de investigaciones [37-41] demuestra la efectividad del uso de estos programas para la recuperación de la lectura.

La efectividad de los programas fonológicos también se ha examinado neurofisiológicamente [42,43]. El estudio de Simos et al [42] demostró que cuando se completa con éxito la intervención intensiva con programas fonológicos, se producen cambios importantes en los perfiles de activación cerebral de los niños con dificultades graves en el aprendizaje de la lectura. Después de la intervención, los participantes de este estudio mejoraron en decodificación lectora y mostraron cambios significativos en la activación cerebral regional. Cabe destacar el incremento de activación en áreas tempoparietales del hemisferio izquierdo, una activación más parecida a la que muestran los lectores sin problemas.



Figura 1. Fotografía de la posición de los labios y la lengua para pronunciar los sonidos dentales /d/ y /t/. Diferentes programas fonológicos muestran estas fotos al niño para hacerle consciente de cómo se forman los sonidos en su boca. El objetivo es que el niño integre la información recibida usando diferentes sistemas: el nombre de la letra (auditivo), cómo se escribe (visual) y cómo se pronuncia (motriz), de ahí el carácter 'multisensorial' de estos programas.



Figura 2. *Motion-onset paradigm*. Este paradigma o tarea se utiliza frecuentemente en los estudios de procesamiento visual, se presenta en ordenador y se puede programar para ajustar la resolución temporal, la frecuencia espacial, el contraste y la luminosidad. El movimiento de las rejillas es más difícil de detectar por los sujetos con dislexia cuando se presenta con baja frecuencia espacial, bajo contraste, baja luminosidad y resolución temporal rápida.

para discriminar cambios rápidos o sucesivos de estímulos, tanto en la modalidad visual como auditiva.

Modalidad visual

Como la lectura requiere el procesamiento de símbolos visuales, los grafemas, es lógico pensar que algunos trastornos de la visión podrían ser causantes de la dislexia. En la década de los setenta se postuló la teoría de la 'persistencia visible' [47]; esta teoría sugirió que el sistema visual magnocelular inhibe el sistema parvocelular de modo que, durante el movimiento de un objeto, la imagen anterior se inhibe para dar paso al procesamiento de la ima-

gen siguiente. Otros autores [48], aplicando esta teoría a la dislexia, sugirieron que durante los movimientos sacádicos de los ojos a lo largo del texto, el sistema magnocelular, incapaz de inhibir el sistema parvocelular, podría ocasionar un borrado deficiente o con retraso del texto leído y, de este modo, interferir con la percepción del texto nuevo. Desde este modelo se muestra que los disléxicos necesitan intervalos interestímulo (ISI) más amplios para percibir como separados dos estímulos secuenciales de baja frecuencia espacial, bajo contraste o baja luminosidad.

Shaywitz et al [43], en un estudio donde comparan dos tipos de intervenciones educativas, una de carácter fonológico y otra de carácter más general dirigida a la práctica de la lectura, mostraron que los niños disléxicos que siguieron la intervención de tipo fonológico mejoraron significativamente en fluidez lectora e incrementaron también la activación en regiones del hemisferio izquierdo. Estos datos indican que la naturaleza de los tratamientos en la lectura es crítica para conseguir resultados exitosos en niños con dificultades lectoras y que el uso de intervenciones basadas en el procesamiento fonológico facilita el desarrollo de los sistemas neurológicos implicados en la lectura eficiente.

Estos resultados tienen implicaciones importantes para la educación; las dificultades de procesamiento fonológico pueden modificarse con programas de intervención adecuados cuyo objetivo sea desarrollar el procesamiento fonológico y las habilidades de decodificación.

La investigación sistemática sobre el rol del procesamiento fonológico en la dislexia en su diagnóstico e intervención ha tenido mucho éxito, aunque también ha demostrado ser insuficiente para tratar la amplia variedad de dificultades lectoras presentadas en la práctica y para tratar la complejidad del proceso lector [44]. La idea de que otras habilidades relacionadas con el procesamiento sensorial son también importantes para aprender a leer está ganando terreno en los últimos años. En este sentido, algunos investigadores muestran que leer depende de cómo procesa el cerebro el *input* visual y auditivo.

MODELO DEL DÉFICIT EN EL PROCESAMIENTO TEMPORAL

Los avances técnicos en el estudio neuropsicológico del lenguaje han hecho posible evaluar la contribución de otras variables psicológicas de dominio general como causas probables de problemas de lectura en los disléxicos. Otros modelos alternativos de dislexia han descrito déficit en el procesamiento temporal [45,46]. El modelo del déficit en el procesamiento temporal de las dificultades de lectura sugiere que los disléxicos sufren de un déficit general, no lingüístico, en el procesamiento temporal

Las tareas más utilizadas para probar esta hipótesis han sido aquellas que presentan contraste y movimiento (Fig. 2). La resolución exitosa de estas tareas se atribuye al funcionamiento correcto de la vía magnocelular del sistema visual y diferentes estudios las han utilizado para examinar esta función [49-52]. Por este motivo, y por el hecho de que algunos sujetos disléxicos muestren problemas en el procesamiento del movimiento y de bajos contrastes, se ha involucrado el sistema magnocelular dentro de los trastornos posiblemente causales de la dislexia [53].

Posteriormente, otros estudios han indicado evidencia neuroanatómica y neurofisiológica que explicaría el fallo del sistema magnocelular en los sujetos disléxicos demostrando células más pequeñas y desorganizadas en las capas magnocelulares del geniculado lateral [54,55].

Eden et al [56] investigaron esta hipótesis usando diferentes técnicas de neuroimagen (RM y MEG) y tareas visuales que implicaban detección de movimiento; los resultados mostraron una diferencia significativa entre sujetos controles y disléxicos en regiones que implicaban al sistema magnocelular. Como contraste, las tareas que presentaban patrones estacionarios (puntos sin movimiento) activaron las mismas áreas del córtex en ambos grupos. Aunque estudios previos han enfatizado los déficit del lenguaje, este estudio reveló diferencias en la organización funcional regional del sistema visual cortical en la dislexia.

Otros estudios [57,58] descartan una alteración de la vía visual primaria en sujetos disléxicos; sin embargo, proponen una alteración del procesamiento temprano occipitotemporal exclusivo en tareas con cadenas de letras. Dicha alteración no aparece en el procesamiento visual de imágenes.

Pese a la importancia de estos estudios para generar hipótesis etiológicas, la heterogeneidad de las tareas utilizadas y el bajo número de sujetos estudiados hasta la fecha hacen difícil generalizar conclusiones de este tipo a toda la población con dislexia.

Las pruebas de la función magnocelular deben realizarse con precaución. La bibliografía reciente advierte de que varias funciones interpretadas como magnocelulares son en realidad funciones mixtas magno y parvocelulares [53].

Los oponentes de esta teoría sostienen que los disléxicos con déficit visuales también muestran déficit en la decodificación fonológica, una causa más probable de dificultades lectoras [7].

No obstante, y a pesar de las críticas, existen diferentes aproximaciones que, aunque controvertidas, servirían, según sus proponentes, para remediar este problema en los disléxicos y obtener mejores resultados en el aprendizaje de la lectura. Entre ellas, la oclusión del ojo izquierdo podría ayudar a niños que presentan inestabilidad binocular al leer a estabilizar su fijación y a mejorar su confusión perceptiva binocular [59].

Otra de las aproximaciones a este problema propone unas gafas con lentes de colores que reciben el nombre de 'haploscópicas'. Estas gafas parecen reajustar, según sus proponentes, la distorsión del texto (palabras que parece que se mueven o borrosas) que padecen algunos niños disléxicos [60].

Modalidad auditiva

La teoría del déficit del procesamiento temporal de las dificultades lectoras presenta una alternativa a la teoría del procesamiento fonológico y sugiere que los disléxicos sufren de un déficit general, no lingüístico, en el procesamiento temporal de estímulos auditivos presentados sucesivamente de forma rápida.

Según esta teoría [61], parece ser que los niños disléxicos requieren ISI más largos y tonos más elevados para discriminar entre estímulos auditivos presentados sucesivamente de forma rápida (Fig. 3).

Por ejemplo, al presentar parejas de estímulos auditivos en sucesión rápida, los disléxicos tienen mayor dificultad que los lectores de la media para determinar cuál de los dos estímulos diferentes presentados fue el primero y para distinguir entre los dos estímulos. Estos estudios han motivado la hipótesis de que el déficit central de la dislexia se debe a disfunciones fisiológicas del procesamiento temporal y que el procesamiento fonológico es solamente una de sus expresiones clínicas. Según esta teoría, la dificultad en el procesamiento temporal impide una percepción clara del habla y origina como resultado las dificultades observadas en el procesamiento fonológico.

Algunos estudios de neuroimagen, que han utilizado tareas que implican la discriminación de dos sonidos presentados en un espacio temporal breve, han indicado que cuando los estímulos auditivos se presentaban entre sí con un intervalo temporal de 100 ms, la respuesta de activación obtenida en el hemisferio izquierdo es mucho menor en los niños disléxicos que en los controles [63-68]. Sin embargo, este modelo del procesamiento temporal auditivo es controvertido. Sus oponentes mantienen que los disléxicos no exhiben un déficit de procesamiento general. En un estudio cuidadosamente controlado y diseñado, utilizando una gran variedad de estímulos verbales y no verbales [6], se mostró que las dificultades de los disléxicos en tareas de discriminación de estímulos auditivos que cambian rápidamente se limitaban únicamente a estímulos fonética y acústicamente similares, como, por ejemplo, /ba/-/da/, y no se producía en estímulos como /ba/-/sa/. Estos resultados parecen ser más consis-

tentes con la teoría del déficit fonológico de la dislexia que con una dificultad en la percepción de cambios rápidos de sonido.

Los proponentes de este modelo explicativo de la dislexia intentan demostrar que la intervención adecuada en las dificultades de procesamiento temporal puede mejorar las habilidades de lectura y lenguaje. La intervención utilizada se basa en la exposición intensiva a ejercicios de escucha presentados por ordenador. En estos ejercicios, el discurso ha sido acústicamente modificado; las pistas acústicas, que cambian con rapidez en el discurso normal, se extienden y se amplifican. Según los defensores de este modelo, después de cuatro semanas de entrenamiento de escucha intensiva, los niños mejoran en la identificación de sonidos, que cada vez se van produciendo más rápido en los ejercicios hasta adaptarse a los del discurso normal. Estos ejercicios ayudarían a los niños con problemas de lenguaje y de lectura a un mejor procesamiento auditivo y a la decodificación de las palabras [69].

Para comprobar si este tratamiento mejoraba los mecanismos disfuncionales neurológicos de la dislexia, se diseñó un estudio de neuroimagen con niños disléxicos de 8 a 12 años [70]. Después de la intervención, los niños disléxicos mostraron una mejoría tanto en el lenguaje oral como en la lectura de palabras. Fisiológicamente, aumentó su actividad en las áreas temporo-parietales izquierdas y en el giro frontal inferior izquierdo y presentó un perfil semejante al que se observa en lectores normales.

COLABORACIÓN Y PROGRESO ACTUAL ENTRE NEUROCIENCIA Y EDUCACIÓN

Antes del advenimiento de las técnicas de neuroimagen, el estudio de los niños con problemas en el desarrollo de la lectura se limitaba a describir sus comportamientos observables; cómo se proyectaban estos comportamientos en las estructuras cerebrales solamente podía asumirse. Es evidente que la lectura ocurre en el cerebro. La comprensión de cómo ocurre es un paso crítico para poder mejorar las estrategias y las técnicas de identificación e intervención educativa y, posiblemente, para poder prevenir el desarrollo de problemas de lectura.

La lectura es un proceso complejo que implica diferentes componentes. Existe un consenso general que afirma que el déficit en el procesamiento fonológico es central a las dificultades de lectura, pero es evidente que algunos niños con dificultades lectoras muestran déficit también en otros ámbitos.

El procesamiento fonológico, en sí mismo, podría relacionarse con otros procesos cognitivos como la atención, el procesamiento sucesivo y la memoria de trabajo [71]. De hecho, el 40% de los niños con dificultades lectoras podría presentar déficit concurrentes de atención [72]. Sin embargo, la relación entre la decodificación fonológica y los problemas de atención, el procesamiento sucesivo y la memoria de trabajo, frecuentemente observada en algunos niños con dificultades lectoras, es compleja.

Otros estudios, citados anteriormente, también manifiestan dificultades en tareas de procesamiento auditivo y visual no lingüístico. Estos datos indican que algunos trastornos de lectura podrían estar causados, exacerbados o, al menos, marcados por un déficit en la percepción no lingüística auditiva y visual. La existencia de estos problemas perceptivos generales va en contra de la idea de que las dificultades lectoras se restringen al procesamiento lingüístico. También se especula sobre la posibilidad de que el procesamiento fonológico, causa fundamental de las dificultades lectoras, se combine o esté afectado en muchos individuos por un déficit en la percepción general.

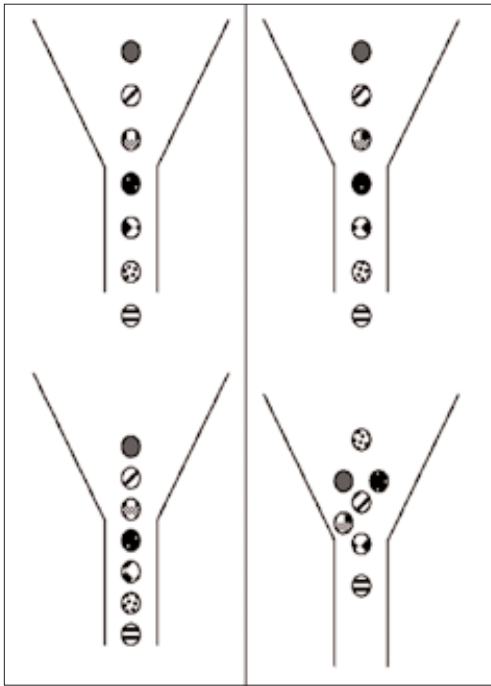


Figura 3. Ilustración del déficit en el procesamiento temporal auditivo. El procesamiento normal se ilustra en las figuras superiores; el déficit de procesamiento temporal se ilustra en las figuras inferiores (adaptado de [62]).

Desafortunadamente, y a pesar de la riqueza de datos comportamentales, la cuestión de si los déficit de la lectura se deben específicamente a causas de naturaleza lingüística, o a causas más generales de procesamiento auditivo y/o visual, todavía no se ha resuelto [20].

Ningún estudio neurobiológico de las dificultades de lectura podría considerarse completo sin una revisión de evidencias comportamentales. En esta línea, los estudios funcionales del cerebro han mostrado déficit en personas con dislexia durante la realización de tareas de procesamiento fonológico, auditivo y visual, utilizadas previamente en estudios comportamentales.

En general, los estudios realizados hasta la fecha, resumidos anteriormente, informan de que los individuos con dislexia presentan una disminución de actividad (comparados con los controles) en el hemisferio izquierdo del córtex tempoparietal y occipitotemporal, tanto durante las tareas de procesamiento fonológico, como en las de procesamiento visual y auditivo. Esta disrupción neurológica se ha mostrado en un gran número de estudios utilizando diferentes metodologías –PET, RM, MEG y electroencefalograma (EEG)–, en múltiples tareas y en diferentes lenguas. Estos resultados se mostraron inicialmente en adultos y, posteriormente, en niños, lo que sugiere que esta disrupción cerebral es fundamental en este trastorno.

Resulta complicado interpretar exactamente los resultados de los estudios de neuroimagen debido a que, en muchas ocasiones, las tareas utilizadas requieren que diferentes tipos de procesamiento (fonológico, visual y auditivo) se produzcan simultánea y coordinadamente. Las tareas de procesamiento fonológico más comúnmente usadas en los estudios previamente citados dependen de estímulos auditivos o impresos que, a su vez, requieren de la interpretación de formas ortográficas. Estas tareas pueden resultar problemáticas por razones teóricas y empíricas. Por ejemplo, la baja activación cerebral mostrada por los dislé-



Figura 4. Actividad de análisis semántico del programa RAVE-O (*Retrieval, Automaticity, Vocabulary, Elaboration, Orthography*) basado en el desarrollo de la fluidez lectora [75].

xicos en tareas de percepción auditiva podría deberse a su baja capacidad neurofisiológica para codificar distinciones fonológicas y no meramente a dificultades con el procesamiento auditivo [73]. En cuanto al procesamiento visual, la concurrencia de anomalías en el sistema visual y las dificultades de lectura en dislexia podrían ser consecuencia de la disfunción de sistemas neuronales comunes. Cualquier relación causal entre procesamiento visual y déficit de lectura continúa siendo especulativa [56].

Se requieren tareas más precisas y estudios más sistemáticos para poder determinar la relación de los diferentes tipos de procesamiento en la lectura.

Actualmente, los estudios de intervención educativa en las dificultades lectoras, que aplican los modelos del déficit fonológico y otros modelos de carácter más general, son muy prometedores desde el punto de vista etiológico y educativo.

Desde el punto de vista del comportamiento, intervenciones de carácter muy diverso: cognitivo [74], fonológico [42,43], auditivo [70], visual [59,60] y basadas en la fluidez lectora [75], han mostrado mejoras significativas en la lectura de palabras en los niños con dislexia. El énfasis de todos estos programas ha sido mejorar las dificultades en la decodificación de palabras y, en algunos casos, la fluidez lectora a través de diferentes métodos y técnicas (Fig. 4).

Los programas no basados específicamente en el entrenamiento fonológico muestran que el desarrollo eficiente de la lectura se apoya también en procesos diferentes a la decodificación fonológica [59]. La lectura, según estos modelos teóricos, se relacionaría funcionalmente con procesos generales de carácter perceptivo o cognitivo.

Anteriormente se resumieron los estudios de neuroimagen, realizados recientemente, sobre la disrupción y la modificación de la respuesta neurológica observada en la dislexia a través del tratamiento educativo. Que sepamos, tres estudios de este tipo se han publicado hasta la fecha.

Dos de ellos utilizaron programas centrados en el desarrollo del procesamiento fonológico. El primer estudio [42], de acuerdo con la tesis de que las dificultades de procesamiento fonológico son la base de las características más comunes de la dislexia, empleó tareas enfocadas al desarrollo de la conciencia fonológica y a las habilidades de decodificación de palabras. El segundo [43] usó también un programa de carácter fonológico basado en el principio del conocimiento alfabético y en la práctica repetida de lectura de palabras para adquirir la fluidez lectora. El tercer estudio [70] basó su intervención en el procesamiento auditivo del lenguaje. En este programa se utilizaron estímulos auditivos no lingüísticos y diálogos modificados acústicamente;

se presentaron tareas de atención auditiva, discriminación, memoria, procesamiento fonológico y comprensión auditiva.

Los tres programas obtuvieron buenos resultados tanto en cuanto al comportamiento como a la clínica. En relación con el comportamiento, tras la intervención se produjo una marcada mejoría en las habilidades de decodificación de palabras en los tres programas. El tercer estudio [70], basado en el procesamiento auditivo, también informó de una mejoría en el lenguaje.

La intervención con estos tres programas también provocó el desarrollo de sistemas neurológicos relacionados con la lectura eficiente, especialmente, el sistema posterior (giro temporal medio superior izquierdo). Los dos estudios que utilizaron programas centrados en el procesamiento fonológico [42,43] informaron de que la activación del hemisferio derecho, mostrada inicialmente, disminuyó después de la intervención. Contrariamente, el programa basado en el procesamiento auditivo [70] informó sobre un aumento de activación en regiones del hemisferio derecho que, normalmente, no se activan durante el procesamiento fonológico; estos resultados, según los autores del estudio, son consistentes con los efectos compensatorios del entrenamiento. Finalmente, este último estudio también informó de un incremento en regiones cerebrales relacionadas con la atención, la memoria, la habilidad de formar asociaciones e incluso en áreas asociadas al procesamiento visual. Este último hallazgo resulta muy interesante ya que este programa no entrenó en el reconocimiento visual de palabras.

Los resultados de estos estudios tienen importantes implicaciones sobre los modelos actuales que explican la naturaleza de la dislexia y también sugieren la plasticidad de los sistemas neurológicos de la lectura en niños. Desde el punto de vista educativo, las implicaciones son claras; la intervención parece desempeñar un rol significativo para el desarrollo de los sistemas neurológicos especializados en la lectura eficiente. Los programas con actividades basadas en el procesamiento fonológico han demostrado ser efectivos tanto en el ámbito educativo como clínico.

Es posible que muchos de los cambios de activación cerebral observados en estos estudios, que combinan las técnicas de neuroimagen con la intervención educativa, sean evidentes a cualquier programa de intervención que mejore la habilidad lectora, mientras que otros cambios podrían ser específicos a un tipo determinado de programa. Se necesitarían más trabajos, en este sentido, para poder generalizar y comprender qué cambios observados, tanto en el comportamiento como funcionales, se asocian a la intervención educativa en general, y cuáles a las características específicas de un programa concreto [70].

En general, todos los programas citados desarrollan habilidades de atención, memoria y procesamiento fonológico e implican diferentes procesos cognitivos y sociales. Por tanto, es difícil discernir con exactitud los cambios específicos en la activación cerebral provocados por cada una de las habilidades desarrolladas en las intervenciones citadas.

Actualmente existe un interés creciente en los diferentes enfoques sobre la naturaleza multidimensional de la lectura y en el estudio de las diferencias individuales que presentan los niños con dislexia. Combinando los resultados de estos modelos podríamos llegar a realizar diagnósticos e intervenciones más ajustados a las características individuales de cada niño [20].

A pesar de los avances realizados en el estudio de la lectura, los trabajos neurocientíficos actuales, como hemos podido comprobar, presentan todavía retos y limitaciones.

Desde el punto de vista metodológico, se han criticado los métodos utilizados para que los participantes respondan a las tareas propuestas; se ha considerado que la respuesta que implica leer en alto es la respuesta más adecuada en tareas de lectura de palabras o en tareas que implican respuestas verbales. También se ha criticado la selección de tareas poco adecuadas, de escaso interés y poco sistemáticas [76].

Desde el punto de vista de la intervención educativa, a pesar de la evidencia de los estudios citados anteriormente sobre el éxito con intervenciones de tipo fonológico, algunas preguntas quedan todavía sin resolver, como, por ejemplo: ¿qué cambios específicos en la activación cerebral provocan diferentes intervenciones? ¿Producirían estos programas los mismos efectos en adultos con dificultades persistentes de lectura? ¿Qué sucede con los niños que sólo muestran pequeñas mejorías? ¿Existe otro tipo de intervenciones más efectivas para estos niños resistentes al tratamiento? Y, por último, ¿mejoran estas intervenciones la comprensión lectora o sólo la decodificación de palabras? La respuesta a estas preguntas extendería la utilidad de la investigación basada en el cerebro [77].

La mayoría de estudios de neuroimagen se ha realizado en los ámbitos léxico y subléxico. El objetivo de la lectura, no obstante, es la comprensión; por tanto, es crucial investigar y conocer los sistemas neurológicos implicados en procesos sintácticos y semánticos en la frase y el texto. Algunos estudios actuales comienzan ya a investigar en esta dirección [78,79].

Aunque un gran número de estudios de comportamiento ha comparado los procesos lectores entre diferentes lenguas y ortografías, hasta la fecha la mayoría de los estudios de neuroimagen se ha realizado en lengua inglesa. Dada la gran variedad de sistemas ortográficos, métodos de lectura y manifestaciones de las dificultades lectoras entre diferentes lenguas y culturas, es necesario realizar más investigación entre diferentes lenguas, tanto para conocer los universales neurobiológicos de la lectura como la variación de la organización funcional que caracteriza específicamente a cada lengua.

El estudio neurobiológico de la lectura requiere que la información se obtenga no solamente con relación a la localización espacial de los sistemas neurológicos implicados en la lectura, sino también con relación al tiempo relativo de conectividad entre esos sistemas. Este objetivo se puede llevar a cabo utilizando diferentes métodos de neuroimagen. La RM y la PET proveen información muy precisa sobre la anatomía cerebral y tienen una gran resolución espacial; sin embargo, la resolución temporal de la actividad neurológica en milisegundos obtenida con técnicas como la MEG o el EEG también proporciona información crucial. Por tanto, la combinación de varias técnicas proporciona la información más completa. Se contempla como situación ideal la fusión de estas tecnologías en una única herramienta [76].

Para finalizar, comentaremos la necesidad de realizar estudios con niños de diferentes edades para poder comprender el desarrollo de la lectura en toda su amplitud. Éste no es un objetivo fácil; la población en general está muy sensibilizada hacia cualquier tipo de prueba neurológica, especialmente, cuando se trata de niños. La investigación con niños es necesaria para poder conocer cómo se desarrolla la lectura, especialmente, en edades tempranas. Es necesario estudiar los precursores tempranos de la lectura durante la etapa de educación infantil para desarrollar intervenciones tempranas apropiadas y poder prevenir futuros problemas lectores.

Pese a las limitaciones de los estudios actuales, los esfuerzos

de los últimos años han aportado suficiente evidencia de un importante rol del procesamiento fonológico en la lectura, aunque las causas deficientes de este procesamiento se desconocen.

La continuación de estos estudios con una selección de muestras mejor caracterizadas, con tareas más sistemáticas y específicas, con estudios longitudinales que examinen el papel del desarrollo, con la utilización de diferentes técnicas de neuroimagen y con estudios en diferentes lenguas y culturas contribuirá a que los hallazgos de la neurociencia tengan cada vez más relevancia para la educación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bruer JT. Education and the brain: a bridge too far. *Educational Researcher* 1997; 26: 4-16.
2. OCDE. La comprensión del cerebro. Hacia una nueva ciencia del aprendizaje. Madrid: Aula XXI Santillana; 2002.
3. Fischer K, Katzir T. Proceedings of the building usable knowledge in mind, brain, and education conference. Harvard: Harvard Graduate School of Education; 2004.
4. Stanovich KE. Explaining the differences between the dyslexic and the garden-variety poor reader: the phonological-core variable-difference model. *J Learn Disabil* 2001; 21: 590-604.
5. Liberman AL. How theories of speech affect research in reading and writing. In Blachman B, ed. *Foundations of reading acquisition and dyslexia: implications for early intervention*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum; 1997. p. 67-92.
6. Mody M, Studdert-Kennedy M, Brady S. Speech perception deficits in poor readers: auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol* 1997; 64: 199-231.
7. Vellutino FR, Fletcher JM, Snowling MJ, Scanlon DM. Specific reading disability (dyslexia): what have we learned in the past four decades? *J Child Psychol Psychiatry* 2004; 45: 2-40.
8. Fawcett A, Nicolson R. Persistence of phonological awareness deficits in older children with dyslexia. *Reading and Writing* 1995; 7: 361-76.
9. Rodrigo M, Jiménez J. An analysis of the word naming errors of normal readers and reading disabled children in Spanish. *J Res Read* 1999; 22: 180-97.
10. Katz R. Phonological deficiencies in children with reading disability: evidence from an object naming task. *Cognition* 1986; 22: 225-57.
11. Snowling MJ, Van Wagtenonk B, Stafford C. Object-naming deficits in developmental dyslexia. *J Res Read* 1988; 11: 67-85.
12. Brady SA. The role of working memory in reading disability. In Brady SA, Shankweiler DP, eds. *Phonological processes in literacy: a tribute to Isabelle Y. Liberman*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum; 1991. p. 129-52.
13. Snowling MJ, Nation K, Moxham P, Gallagher A, Frith U. Phonological processing deficits in dyslexic students: a preliminary account. *J Res Read* 1997; 20: 31-4.
14. Torgesen J, Rashotte C, Wagner R. Longitudinal studies of phonological processing and reading. *J Learn Disabil* 1994; 27: 276-86.
15. Blachman B. What we have learned from longitudinal studies of phonological processing and reading, and some unanswered questions: a response to Torgesen, Rashotte and Wagner. *J Learn Disabil* 1994; 27: 287-91.
16. Vellutino F, Scanlon DM. Phonological coding, phonological awareness, and reading ability: evidence from longitudinal and experimental study. *Merrill Palmer Q* 1987; 33: 321-63.
17. Jiménez JE. Conciencia fonológica y retraso lector en una ortografía transparente. *Infancia y Aprendizaje* 1996; 9: 3-27.
18. Alegria J, Pignot E, Morais J. Phonetic analysis of speech and memory codes in beginning readers. *Memory Cogn* 1982; 10: 451-6.
19. Cossu G, Shankweiler D, Liberman IY, Tola G, Katz L. Awareness of phonological segments and reading ability in Italian children. *Applied Psycholinguistics* 1988; 9: 1-16.
20. Lozano A, Ramírez M, Ostrosky-Solís F. Neurobiología de la dislexia del desarrollo: una revisión. *Rev Neurol* 2003; 36: 1077-82.
21. Berninger VW, Richards TL. *Brain literacy for educators and psychologists*. San Diego: Academic Press; 2002.
22. Wolf M, O'Rourke A, Gidney C, Lovett M, Cirino P, Morris R. The second deficit: an investigation of the independence of phonological and naming-speed deficits in developmental dyslexia. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal* 2002; 15: 43-72.
23. Eden GF, Zeffiro TA. Neural systems affected in developmental dyslexia revealed by functional neuroimaging. *Neuron* 1998; 21: 279-82.
24. Pugh KR, Shaywitz BA, Shaywitz SE, Shankweiler DP, Katz L, Fletcher JM, et al. Predicting reading performance from neuroimaging profiles: the cerebral basis of phonological effects in printed word identification. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1997; 23: 299-318.
25. Rumsey JM, Andreason P, Zametkin AJ, Aquino T, King AC, Hamburger SD, et al. Failure to activate the left temporo-parietal cortex in dyslexia: an oxygen 15 positron emission tomographic study. *Arch Neurol* 1992; 49: 527-34.
26. Shaywitz SE, Shaywitz BA, Pugh KR, Fulbright RK, Constable RT, Mencl WE, et al. Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1998; 95: 2636-41.
27. Temple E. Brain mechanisms in normal and dyslexic readers. *Curr Opin Neurobiol* 2002; 12: 178-83.
28. Pierce ME. Examining the contributions of neuroscience to our understanding of word reading in normal and dyslexic children [unpublished]. Harvard: Harvard Graduate School of Education; 2004.
29. Backes W, Vuurman E, Wennekes R, Spronk P, Wuisman M, Van Engelshoven J, et al. Atypical brain activation of reading processes in children with developmental dyslexia. *J Child Neurol* 2002; 17: 867-71.
30. Georgiewa P, Rzanny R, Hopf J, Knab R, Glauche V, Kaiser W, et al. fMRI during word processing in dyslexic and normal reading children. *Neuroreport* 1999; 10: 3459-65.
31. Georgiewa P, Rzanny R, Gaser C, Gerhard U, Viwegw U, Freesmeyer D, et al. Phonological processing in dyslexic children: a study combining functional imaging and even related potentials. *Neurosci Lett* 2002; 318: 5-8.
32. Shaywitz BA, Shaywitz SE, Pugh KR, Mencl WE, Fulbright RK, Skudlarski P, et al. Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biol Psychiatry* 2002; 52: 101-10.
33. Simos PG, Breier JL, Fletcher JM, Bergman E, Papanicolau AC. Cerebral mechanisms involved in word reading in dyslexic children: a magnetic source imaging approach. *Cereb Cortex* 2000; 10: 809-16.
34. Simos PG, Breier JL, Fletcher JM, Bergman E, Fishbeck K, Papanicolau AC. Brain activation profiles in dyslexic children during non-word reading: a magnetic source imaging study. *Neurosci Lett* 2000; 290: 61-5.
35. Temple E, Poldrack RA, Salidis J, Deutsch GK, Tallal P, Merzenich MM, et al. Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children: an fMRI study. *Neuroreport* 2001; 12: 299-307.
36. Wimmer H, Hutzler F, Wiener C. Children with dyslexia and right parietal lobe dysfunction: event-related potentials in response to words and pseudowords. *Neurosci Lett* 2002; 331: 211-3.
37. Hulme C. *Reading retardation and multi-sensory teaching*. London: Routledge & Kegan Paul; 1981.
38. Jiménez JE, Ortiz MR. *Conciencia fonológica y aprendizaje de la lectura: teoría, evaluación e intervención*. Madrid: Síntesis; 1998.
39. Ball EW, Blachman BA. Does phoneme awareness training in kindergarten make a difference in early word recognition and developmental spelling? *Reading Research Quarterly* 1991; 26: 49-66.
40. Foorman BR, Francis D, Fletcher JK, Schatschneider C, Mehta P. The role of instruction in learning to read: preventing reading failure in at-risk children. *J Educ Psychol* 1998; 90: 37-55.
41. Torgesen JK, Morgan ST, Davis C. Effects of two types of phonological awareness training on word learning in kindergarten children. *J Educ Psychol* 1992; 84: 364-70.
42. Simos PG, Fletcher JM, Bergman E, Breier JI, Foorman BR, Castillo EM, et al. Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology* 2002; 58: 1203-13.
43. Shaywitz B, Shaywitz S, Blachman B, Pugh KR, Fulbright R, Skudlarski P, et al. Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically-based intervention. *Biol Psychiatry* 2004; 55: 926-33.
44. Wolf M, Bowers P. The 'double deficit hypothesis' for the developmental dyslexias. *J Educ Psychol* 1999; 91: 1-24.

45. Stein J. The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia* 2001; 7: 12-36.
46. Tallal P, Miller S, Jenkins W, Merzenich M. The role of temporal processing in developmental language-based learning disorders: research and clinical implications. In Blachman B, ed. *Foundations of reading acquisition and dyslexia: implications for early intervention*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum; 1997. p. 49-66.
47. Breitmeyer B, Ganz L. Implications of sustained and transient channels for theories of visual pattern masking, saccadic suppression, and information processing. *Psychol Rev* 1976; 83: 1-36.
48. Lovegrove W, Heddle M, Slaghuys W. Reading disability: spatial frequency specific deficits in visual information storage. *Neuropsychology* 1980; 18: 111-5.
49. Cestnick L, Coltheart M. The relationship between language and visual processing in developmental dyslexics. *Cognition* 1999; 71: 231-55.
50. Romani A, Conte S, Callicio R, Bergamaschi R, Versino M, Lanzi G, et al. Visual evoked potential abnormalities in dyslexic children. *Funct Neurol* 2001; 16: 219-29.
51. Slaghuys W, Twell A, Kingston K. Visual and language processing deficits are concurrent in dyslexia and continue into adulthood. *Cortex* 1996; 32: 413-38.
52. Scheurpflug P, Plume E, Vetter V, Schulte-Koerne G, Deimel W, Bartling J, et al. Visual information processing in dyslexic children. *Clin Neurophysiol* 2004; 115: 90-6.
53. Galaburda AM, Cestnik L. Dislexia del desarrollo. *Rev Neurol* 2003; 36: S3-9.
54. Galaburda AM, Livingstone M. Evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Ann N Y Acad Sci* 1993; 682: 70-82.
55. Livingstone M, Rosen G, Drislane F, Galaburda A. Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1991; 88: 7943-7.
56. Eden GF, Van Meter JW, Rumsey JM, Maisog JM, Woods RP, Zeffiro TA. Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain imaging. *Nature* 1996; 382: 66-9.
57. Helenius P, Tarkiainen A, Cornelisen P, Hansen PC, Salmelin R. Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letterstrings in dyslexic adults. *Cereb Cortex* 1999; 4: 476-83.
58. Salmelin R, Helenius P. Functional neuroanatomy of impaired reading in dyslexia. *Scientific Studies of Reading* 2004; 8: 257-72.
59. Stein J. *The neurology of reading difficulties*. In Wolf M, ed. *Dyslexia, fluency and the brain*. Maryland: York Press; 2001.
60. Harris D, MacRow-Hill SJ. Application of ChromaGen haploscopic lenses to patients with dyslexia: a double-masked, placebo-controlled trial. *J Am Optom Assoc* 1999; 70: 629-40.
61. Tallal P. Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain Lang* 1980; 9: 182-98.
62. Klein RM. Observations on the temporal correlates of reading failure. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal* 2002; 15: 207-32.
63. Joliot M, Ribary U, Llinás R. Human oscillatory brain activity near 40 Hz coexists with cognitive temporal binding. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1994; 91: 11748-51.
64. Nagarajan S, Mahncke H, Salz T, Tallal P, Roberts T, Merzenich NM. Cortical auditory signal processing in poor readers. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1999; 96: 6483-8.
65. Poldrack RA, Temple E, Protapapas A, Nagarajan S, Tallal P, Merzenich M, et al. Relations between the neural bases of dynamic auditory processing and phonological processing: evidence from fMRI. *J Cogn Neurosci* 2001; 13: 687-9.
66. Corina D, Richards T, Serafini S, Richards AL, Steury K, Abbot RD, et al. fMRI auditory language differences between dyslexic and able reading children. *Neuroreport* 2001; 12: 1195-201.
67. Helenius P, Salmelin R, Richardson U, Leinonen S, Lyytinen H. Abnormal auditory cortical activation in dyslexia 100 msec after speech onset. *J Cogn Neurosci* 2002; 14: 603-17.
68. Ortiz-Alonso T, Navarro M, Vila-Abad E. P300 component of the auditory event-related potentials and dyslexia. *Funct Neurol* 1990; 5: 333-8.
69. Tallal P, Merzenich M, Miller S, Jenkins W. Language learning impairment: integrating research and remediation. *Scand J Psychol* 1998; 39: 197-9.
70. Temple E, Deutsch GK, Poldrack RA, Miller SL, Tallal P, Merzenich M, et al. Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003; 100: 2860-6.
71. Das JP, Mishra RK, Kirby JR. Cognitive patterns of children with dyslexia: a comparison between groups with high and average nonverbal intelligence. *J Learn Disabil* 1994; 27: 235-53.
72. Shaywitz SE, Fletcher JM, Shaywitz BA. Defining and classifying learning disabilities and attention-deficit/hyperactivity disorder. *J Child Neurol* 1995; 10: 50-7.
73. Mody M. Neurobiological correlates of language and reading impairments. In Addison S, Silliman ER, Ehren BJ, Akpel K, eds. *Handbook of language and literacy*. New York: Guilford Press; 2004. p. 49-73.
74. Das JP, Mishra RK, Pool JE. An experiment on cognitive remediation of word-reading difficulty. *J Learn Disabil* 1995; 28: 66-79.
75. Wolf M, Miller L, Donnelly K. Retrieval, Automaticity, Vocabulary, Elaboration, Orthography (RAVE-O): a comprehensive, fluency-based reading intervention program. *J Learn Disabil* 2000; 33: 375-86.
76. Palmer ED, Brown TT, Petersen SE, Bradley LS. Investigation of the functional neuroanatomy of single word reading and its development. *Scientific Studies of Reading* 2004; 8: 203-23.
77. Sandak R, Mencl E, Frost SJ, Pugh KR. The neurobiological basis of skilled and impaired reading: recent findings and new directions. *Scientific Studies of Reading* 2004; 8: 273-92.
78. Caplan D. Functional neuroimaging studies of written sentence comprehension. *Scientific Studies of Reading* 2004; 8: 225-40.
79. Keller TA, Carpenter PA, Just MA. The neural bases of sentence comprehension: a fMRI examination of syntactic and lexical processing. *Cereb Cortex* 2001; 11: 223-37.

CONTRIBUTIONS OF NEUROSCIENCE TO THE DIAGNOSIS AND EDUCATIONAL TREATMENT OF DEVELOPMENTAL DYSLEXIA

Summary. Aim. *To examine the advances made in the fields of cognitive psychology, neuroscience and education and how they have contributed to each other.* Development. *The paper offers a review of the current models of dyslexia and analyses the relation between these models and neuroimaging studies and educational intervention. The first model presented here is the 'phonological deficit' model, which is the most widely proven and accepted today. People with dyslexia have difficulty in completing tasks that involve segmenting language at a phonological level. Neuroimaging studies also reveal the existence of atypical brain activation in dyslexics while performing tasks that require phonological processing. Intervention programmes of a phonological nature have proved to be effective on both a behavioural and a neurophysiological level. Given the complexity of the reading process, further research is currently looking into other models. Although the 'temporal processing' deficit model is more controversial and not as widely accepted as the previous model, some reports provide both behavioural and neurophysiological evidence for the existence of differences in the visual and auditory processing of dyslexic and control subjects. Different educational approaches to put this temporal processing deficit to rights have been tested in dyslexic children with successful outcomes. Finally, the present status between neuroscience and education in the area of reading disorders is examined and future implications concerning the different approaches and methods used in current research are analysed.* Conclusions. *Although we are still a long way from understanding the causes of reading deficiencies, collaboration between neuroscience, psychology and education does help further our understanding of the psychology of reading, its diagnosis and its intervention.* [REV NEUROL 2007; 44: 173-80]

Key words. Auditory temporal processing. Developmental dyslexia. Intervention. Neuroimaging. Phonological processing. Visual temporal processing.