

Neuroscience and education: developmental study of a hemispherectomy case / *Neurociencia y educación: estudio evolutivo de un caso de hemisferectomía*

Carmen López-Escribano^a and Antonio Moreno^b

^aUniversidad Complutense de Madrid; ^bINSERM U992

(Received 11 May 2012; accepted 31 July 2013)

Abstract: Neuroscience, psychology, and education are disciplines with different philosophies and methods. Although an interdisciplinary approach is an opportunity to explore the educational implications of neuropsychological research, a good model for this dialogue does not exist yet. To promote the integration of these disciplines, which investigate human learning, the present work analyzes a hemispherectomy case study of a high-functioning young boy. Our goal is to present a neuropsychological vision about learning, the mind, and the influence of the context. This case is extremely rare, as not many individuals have been treated with this technique, and must be interpreted with caution. Nevertheless, the presented case study, and other similar cases that we will mention, afford a unique angle from which we can explore neuroscientific principles such as: the brain is highly plastic, the brain is changed by experience and learning, and human brains are as unique as faces. The goal is to promote the integration of neuroscience, psychology and education with a note of attention to misconceptions and myths in a science not completely known yet.

Keywords: neuroscience; cognition; education; psychology; brain; epilepsy; hemispherectomy

Resumen: Neurociencia, psicología y educación son disciplinas con filosofías y métodos diferentes. El diálogo entre estas ciencias, aunque necesario, es complicado. No obstante, actualmente se investiga para integrar estas tres perspectivas sobre el aprendizaje. En esta línea integradora, en el presente trabajo analizamos un caso de estudio de hemisferectomía con el objetivo de ofrecer una visión neurocientífica sobre el aprendizaje, la mente y el papel del contexto. El caso de estudio que presentamos es muy excepcional tanto por su exitosa recuperación, como por el escaso número de sujetos que han sido tratados con esta técnica. Este caso, y otros similares que revisaremos, servirán para ilustrar y reflexionar sobre tres principios extraídos de la neurociencia: el cerebro es plástico, la experiencia y el aprendizaje cambian el

English version: pp. 1–18 / *Versión en español:* pp. 19–37

References / *Referencias:* pp. 37–39

Translated from Spanish / *Traducción del español:* Jennifer Martin

Authors' Address / *Correspondencia con los autores:* Carmen López-Escribano, Universidad Complutense de Madrid, C/Rector Royo Villanova, 1, 28040 Madrid, España. E-mail: carmenle@ucm.es

cerebro y cada cerebro es diferente. El objetivo es aportar conexiones entre neurociencia, psicología y educación, insertando una nota de precaución sobre la extracción de conclusiones precipitadas en áreas de estudio no totalmente conocidas todavía.

Palabras clave: neurociencia; cognición; educación; psicología; cerebro; hemisferectomía; epilepsia

Interest in the brain and the important role it plays in learning is not anything new. Researchers from across many different disciplines have spent nearly a century studying the brain and forming conclusions on its growth and development.

However, past researchers did not have any method of studying the brain other than through surgery or autopsy. An autopsy allows the location and size of the cerebral structures to be studied, but nothing can be learned about the functioning brain.

Knowledge of the human brain has advanced considerably in the last 20 years thanks to the availability of non-invasive neuroimaging technology used for measuring cerebral functions during the performance of cognitive tasks (see Rodrigo, 2010).

In spite of the advances made in neuroscience and education during recent years, the dialogue between neuroscientists and educators, although necessary, is still quite limited as well as complicated. This situation is due to the fact that education and neuroscience are very different disciplines, and as such, it is still not very clear how they may collaborate with each other and apply findings across their respective disciplines.

The context of interest for a neuroscientist is, of course, the brain and the measurable changes in brain activity. In contrast, the relevant context for an educator is the mind and the environment that the learner is found in. Unfortunately, the different educational contexts are beyond the scope of current neuroscientific methods. Neuroscientific studies are performed within a very limited time frame and in the specific room that the scanner is housed in.

Nevertheless, in spite of the difficulties that educational neuroscience is faced with, an emerging interdisciplinary neurocognitive current of thought exists that aims to integrate all of the distinct perspectives on the brain (cognitive, social, and cultural) to address learning issues (Varma, McCandliss, & Schwartz, 2008).

Hruby, Goswami, Frederiksen, and Perfetti (2011) explain:

Unfortunately, the computational-brain framework is the one most often garbled in the popular media and brain-based education materials. At the same time, an alternative theoretical framework is emerging that is organic rather than mechanistic, biological rather than representational, built on the motif of learning as psychological development, and powered by the bioecological dynamics of organisms as agents growing functionally in response to their ecological contingencies, environments to which they adapt through behavioural, developmental, epigenetic, and even evolutionary processes. The awareness of complex dynamical effects over time and across scales of analysis is certainly relevant to research in literacy education, particularly to research from a sociocultural perspective and models of situated cognition (p. 168).

In this respect, innovative designs have been implemented in recent years with the purpose of explaining, from a neuroscientific view, the effects that context can have on learning (Battro, 2000; Immordino-Yang, 2007; Immordino-Yang & Faeth, 2010). In following a design that is similar to the previously mentioned studies, our goal is to present a case study that attempts to go beyond neuromyths (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico & OCDE, 2002; Tokuhamma-Espinosa, 2010) and simplifications. Neuromyths abound in the field of education and are most often misleading. We will replace them with principles of brain functioning that have been gathered together during years of debate and neuroscientific research, and that may be useful and valid for educators. The principles we refer to do not reflect any single neuroscientific finding or cerebral area, since drawing a direct connection between these findings and education is inappropriate and premature (Immordino-Yang & Faeth, 2010). We will instead reflect on the conclusions of our case study, which we will compare with other similar cases, in order to present a neuroscientific view on learning, development, and the role of context. When studying a case, our interest is focused on developing a connection between behaviour and the brain, as well as the role that experience plays in the organization of the mind and the brain. In other words, we are more interested in reflecting on *how* different brain functions develop rather than on *where* they are located.

Before introducing our case study, we will present research that examines the development of patients who have undergone a hemispherectomy as a result of suffering from intractable epilepsy. All of these studies, together with the detailed analysis of our particular case, will serve to exemplify the goals of this present research.

Studies from Curtiss, de Bode, and Mathern (2001), Liégeois, Cross, Polkey, Harkness, and Vargha-Khadem (2008), and van Empelen et al. (2005) are among those that examined patients who had undergone both a left and a right hemispherectomy. Vargha-Khadem et al. (1997) analyzed a left hemispherectomy case. Finally, Vigliano, Margary, Bagnasco, and Jarre (2010) present a right hemispherectomy case, as we do in this article.

Curtiss et al. (2001) studied the evolution and development of language in 43 hemispherectomy patients. They concluded that the removal of the right hemisphere correlated with better linguistic ability results only in the group of patients with ‘acquired pathologies’, but this was not so for the group with ‘developmental pathologies’. ‘Acquired pathology’ means that the condition or damage disrupts brain functions during their development or after the functions have already been established. ‘Developmental pathology’ means that the damage to the brain occurred before the function was established. As a conclusion, these authors deemed the etiology of the brain damage to be more relevant to language development than the side of the brain that is surgically removed.

By the same token, Liégeois et al. (2008) carried out research on 30 patients who underwent a hemispherectomy during childhood (17 left and 13 right), concluding that the *grosso modo* language functions are often recovered after the operation. It seems that once these functions have emerged, their subsequent

development is less dependent on the integrity of the cerebral hemispheres. According to these authors, both hemispheres, separately, have similar potential to develop an adequate level of receptive vocabulary. In line with the conclusions from the above-mentioned study, this study supports the thesis that the substantial limitations of language are actually due to congenital — pre/perinatal — pathologies or postnatal damage suffered in either of the two hemispheres, rather than to the surgically removed hemisphere. This study also shows that the surgery does not affect the verbal or performance intelligence quotient of the hemispherectomy patients.

Van Empelen et al. (2005) performed a study on the evolution of 12 children who underwent a hemispherectomy due to suffering from intractable epilepsy. They concluded that the frequency and severity of the epileptic attacks decreased considerably (the epileptic attacks totally disappeared in nine of the cases) after the operation. These patients improved their quality of life and their social and fine motor skills as a result of the improvement or disappearance of the epileptic attacks. The cognitive ability of these children, measured by an intelligence test, did not change or remained similar before and after the surgery.

Vargha-Khadem et al. (1997) presented a case study of a child who had a left hemispherectomy at the age of eight and a half years old. This boy, surprisingly, at the age of nine years old began to acquire language despite not having previously developed it during early childhood, due to suffering from a disease (in the left hemisphere) that prevented it. Interestingly, this patient did not suffer negative consequences from the prior time period in which he was mute and had limited comprehension. Even though this case and another nine treated with a left hemispherectomy presented limitations in linguistic and cognitive abilities, what this particular boy achieved seems to defy the widespread belief that early childhood is especially critical for language acquisition. This study's conclusion is that the development of appropriate language, well articulated and structured, can be achieved as late as nine years of age by using only the right brain hemisphere. In some way this research also represents a challenge to the conclusions from the previously mentioned studies, since in this case, despite the 'perinatal' and early acquired disorder, the patient unexpectedly improved his language after the surgery.

Finally, we will discuss the conclusions from research by Vigliano et al. (2010) of a case study of a girl who had a right hemispherectomy when she was five years old. The epileptic attacks disappeared after the surgery and she stopped taking her medication. The transference of functions from the right hemisphere to the left happened very soon thereafter. The authors concluded that undergoing the surgery at such a young age, the plasticity of the brain, and the intensive rehabilitation treatment afterward, seemed to be important factors in determining such a cognitively favourable result. Continuous development of visual perception could be seen after the surgery; however, the problem of visual-spatial organization persisted, which, according to the authors, revealed that more complex spatial representation functions, such as the 'Rey complex figure' drawing task, seem to be processed by the right hemisphere. Language, the best preserved ability in this

patient, was completely recovered and improved after special treatment following the surgery. Attention and working memory also improved. The authors point out that the least developed ability in this case was the processing speed of complex tasks.

In general, we can conclude from all of these studies that the surgery seems to favour, in a high percentage of cases, the disappearance of the attacks, which carries with it an improvement in the quality of the patients' lives. According to the above-mentioned studies, it appears that language is recovered in the majority of the cases, at least at the functional level, with the most influential factor in its recuperation being etiology rather than the brain hemisphere that is removed. The study by Vargha-Khadem et al. (1997) emphasizes this point, since in this case, language acquisition is remarkable, taking into account the patient's age and etiology. As a conclusion for the majority of these studies, it should also be noted that the surgery did not appear to affect cognitive functions, which remained similar after said surgery. The study carried out by Vigliano et al. (2010) also reveals the difficulty in spatial organization and the absence of speed in performing complex tasks in the analyzed case: the authors attribute these problems to the lack of a right hemisphere in this case.

Next, we present our case study of a high functioning young boy who underwent a right hemispherectomy, with the goal of providing possible connections between neuroscience and education from an interdisciplinary perspective that integrates the study of the brain, cognition, and the influence of social and cultural aspects in learning. Even though this case should be interpreted cautiously, this young boy offers us a unique angle from which we can explore the principles governing the relationship between the brain, development, and experience.

The first objective of this current study is to interpret and reflect on the role of context in development and learning — in the light of the presented case and in comparison with the other cases reviewed — in relation to three principles drawn from neuroscientific research: (1) the brain is highly plastic, therefore having the capacity for learning and developing throughout the whole life cycle, (2) experience and learning change the brain, and (3) each brain, just like each face, is unique.

The second objective will be to present conclusions regarding education in relation to the three neuroscientific principles analyzed.

Method

Participant

Nico, the participant in this study and whose name has been used with permission, was born in Argentina in October 1989. From a clinical point of view, he suffered from left congenital hemiplegia. Nevertheless, he learned to walk before he was 19 months old and began to speak in short phrases before he was two years old. At 22 months he began to have epileptic seizures; however, medication had no effect. The increasing crisis, the repeated convulsions, and the loss of consciousness during seizures led the family to opt to try a neurosurgical treatment. Thus, at

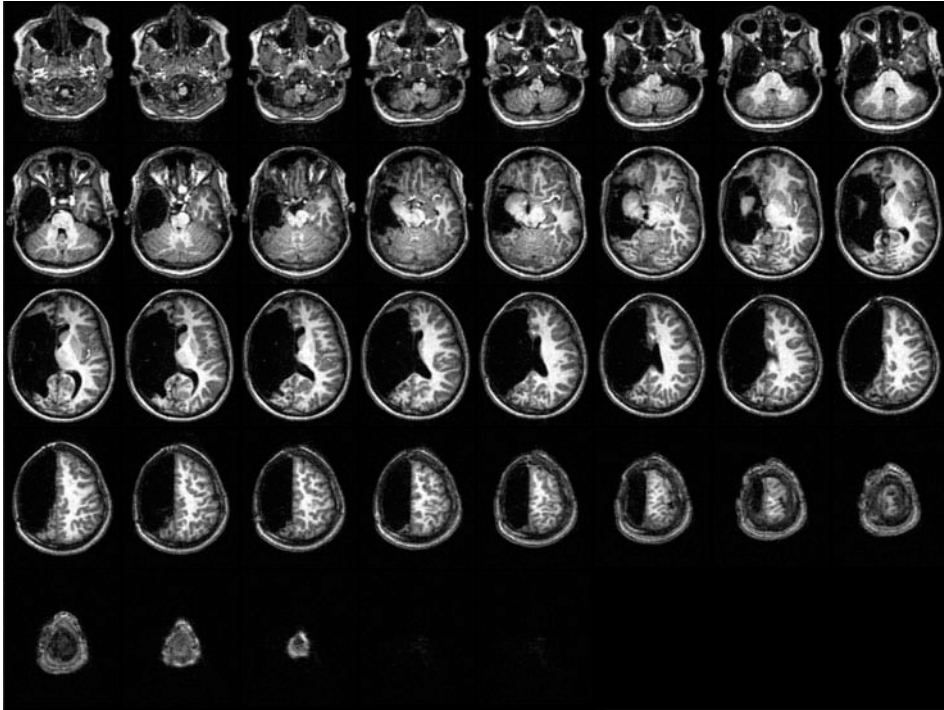


Figure 1. MRI scan of Nico's brain showing axial cuts (November 2011). Radiological convention ('left is right').

the age of three years and seven months, Nico had a hemispherectomy of the right hemisphere.

The technique applied in Nico's case involved the removal of the central cortical region, the parasagittal cortex, and the cingulate gyrus, plus a complete temporal lobotomy, including the amygdala and hippocampus. Portions of the frontal lobe and the remaining parietal-occipital lobes were also detached from the brain stem and from the opposite hemisphere (Battro, 2000). Figure 1 illustrates Nico's brain anatomy (at the present time) as a result of the surgery performed. The operation was completely successful and his improvement was immediate: the epileptic seizures disappeared and he began to walk within a few days.

At the beginning of 2011 Nico experienced a rather strong seizure, the first since his operation almost 18 years before. As a result of this, Nico is currently taking medication as a preventative measure.

From a social and educational point of view, Nico comes from a medium-high social class family that has always been involved in his education. Nico's mother tongue is Spanish, but he also speaks English well and is capable of maintaining a relaxed conversation in the language.

His parents were very attentive during his recuperation after the hemispherectomy. When Nico was five years old, he began normal schooling with the aid of a computer. During the first few month of pre-school Nico often felt tired, but he

was offered the opportunity and space to rest and relax in. Thus, his education took place in a completely normal way.

Nico's primary education was equally successful, instead of a notebook he used a laptop computer with which he learned to write and keep up with the pace of his classmates. He experienced great difficulty in writing during the primary school years, with it becoming problematic for him to write letters and numbers by hand; he was also a bit delayed in the area of drawing as compared to his classmates; however, he always stood out in verbal ability. Nevertheless, and in spite of his difficulties, his grades during his primary education years were good (Battro, 2000).

It is interesting to note the progression that Nico made in areas such as drawing and painting as well as writing by hand, since, as we discussed above, his primary education results were poor in these areas. His fine motor skills, strong lines, and artistic sense have progressed quite favourably since the primary school stage up until now. As an illustrative example, Figure 2 shows a picture created by Nico of a fencing technique.

Regarding his psychomotor and physical development, Nico lives in an athletic home: his parents, devoted to sports, have been his personal trainers in more than one sense. Despite his left hemianopia and hemiplegia, Nico learned to swim, play tennis, ride a bicycle, and play soccer through determined persistence and practice.

From a socioemotional perspective, Nico's development has also been completely normal. Always supported by his family, he has a marked sense of humour, is affectionate, and popular among those around him.

Nico finished his primary education in Argentina and then moved with his family to Madrid, the city where he currently lives and where he completed his college preparatory studies. He abandoned his studies at the age of 18 and began to



Figure 2. Painting of fencing done by Nico.

demonstrate talent in two areas: fencing and painting. He is currently a member of the Spanish national wheelchair fencing team and his dream is to become a wheelchair fencing instructor. Nico's most apparent problem is that he has a slight limp and he cannot easily move his left arm. He also suffers from left hemianopia, although this does not make activities such as reading, painting, or fencing impossible.

The first written reference about Nico came from Battro (2000) and occurred five years after the operation. Afterward, Immordino-Yang (2007) wrote her doctoral thesis as well as several publications on this case. These publications were in English, and up until now, there has not been anything published in Spanish documenting Nico's case.

The present study was motivated by the monitoring of Nico's evolution carried out by the Cognitive Neuroimaging Unit, a cognitive neuroscience laboratory near Paris (France), where one of the authors of this study currently works.

Procedure

Nico had just turned 22 years old when this study was performed. The tests described hereafter were carried out by the authors of this article, individually in Nico's home, during two consecutive mornings. Two sessions were held in order to avoid having just one that would be too long and tiring.

Two of the tests selected for this study (the WAIS-III and the Rey-Osterrieth complex figure test) had already been performed by Nico on previous occasions, which is why it made sense to us to have him perform them again, in order to compare the current results with those that were previously obtained (see the results section). The Stroop test was selected because it is a neuropsychological test that is widely used to research executive functions and processing speed. We were particularly interested in this test in order to analyze the interference effect, since according to what is documented in the test itself, people with brain damage have difficulty performing this task.

The tests were given in the following order: the Rey-Osterrieth complex figure test (30 minutes), Stroop test (10 minutes), and the informal interview (approximately 1 hour and 30 minutes) during the first session, and the WAIS-III test (1 hour and 30 minutes) during the second.

Instruments

The Rey-Osterrieth Complex Figure Test (ROCF). The 'complex-figure' (Osterrieth, 1944; Rey, 1941) was designed to investigate perceptual organization as well as visual memory and motor coordination in individuals who have suffered brain damage. The administration of this test involves asking the participant to copy a complex figure (unknown to him) by hand and without any time limit, while assessing his organizational skills and planning strategies to solve problems, as well as his visual-constructive skills. Afterward, without prior notice and without the aid of the model, the participant must immediately reproduce the

same figure, and then do the same again after a delay of 30 minutes, for the purpose of assessing their ability to remember non-verbal material.

Stroop Test. In psychology, the Stroop effect is a type of semantic interference in the reaction time of a task: when a colour's name is written in a colour different from the one expressed by the semantic meaning, a delay in processing the colour of the word is produced, which increases the reaction time and favours errors (Stroop, 1935). Specifically, the test consists of showing the participant three cards, each measuring 35.5×10 cm. The first card has 17 names of colours printed in black ink. The second contains 17 colour bars, measuring 2.6×8 cm each. Finally, the third card has 17 names of colours printed in a different colour (for example, the word 'red' is printed in blue ink) and the participant must say the colour of the ink. The words and the bars are arranged vertically on each card. Typically, the reading time on the last card (the interference card) is quite higher than the reading time of the words on the first card or the naming of the colours from the second card.

Wechsler Adult Intelligence Scale, WAIS III. For this study we have used the Spanish version of the third edition of the Wechsler intelligence scale (1997), WAIS-III. This version was standardized with a total sample of $N = 1500$ adult Spanish participants and has shown good reliability and validity (Wechsler, 2001). The WAIS-III has 14 subtests: seven Verbal (Vocabulary, Similarities, Arithmetic, Digit Span, Information, Comprehension, Letter-Number Sequencing), and seven Performance (Picture Completion, Digit Symbol-Coding, Block Design, Matrix Reasoning, Picture Arrangement, Symbol Search, Object Assembly). These subscales enable the collection of traditional scores for IQ, as well as for four indexes: Verbal Comprehension (Vocabulary, Similarities, Information), Perceptual Organization (Picture Completion, Block Design, Matrix Reasoning), Working Memory (Arithmetic, Digit Span, Letter-Number Sequencing), and Processing Speed (Digit Symbol, Symbol Search).

Informal interview. After he completed the tests on the first day, we conducted an informal interview with Nico. The goal of this conversation was to see how he expressed himself orally in a casual setting and to learn about his hobbies. The questions asked were: 'What do you do in your free time?' and 'What activities do you find most rewarding?'. Although we had not prepared a script ahead of time for this interview, we did collect and summarize Nico's answers once the interview was over.

Following, we will discuss the most relevant information gleaned from this interview in relation to Nico's language ability and his hobbies.

Regarding his language, we observed that both his verbal and non-verbal expressions, as well as his way of interacting, were completely appropriate and correct. Neither of the two interviewers observed any difficulty in Nico's use of language.

Referring to his hobbies, Nico showed us his paintings, his collection of miniatures, and shared his future plans regarding fencing with us: he is actually

a member of the Spanish national wheelchair fencing team and his dream is to become a fencing instructor.

He has created paintings of landscapes, fencing, and has even painted a self-portrait. His paintings often carry a message. For example, he has painted the portrait of Dorian Gray, and a picture of a wheelchair with a prosthetic leg and with all of the fencing equipment.

He also showed us a collection of miniatures that he bought disassembled so that he could later assemble and decorate them with small paintbrushes and colours. Assembling these miniatures requires an enormous amount of attention, fine motor skills, and spatial abilities. Nico actually has a very nicely elaborated collection.

Nico collaborated with us the entire time and was very attentive while also demonstrating a great sense of humour both while performing the tests and during the interview. He felt very comfortable while taking the tests of a verbal nature (vocabulary, similarities, and comprehension), although somewhat less so during the arithmetic tests.

Results

Nico's IQ is 112, his verbal IQ is 127, and his performance IQ is 93 (see [Table 1](#)). These results are within normal IQ range. Five years after the hemispherectomy (Battro, 2000) Nico's IQ was 109 (with a verbal IQ of 118 and a performance IQ of 97), whereas in 2002¹ (Immordino-Yang, 2007), his IQ was 68 (verbal IQ of 75 and performance IQ of 65; cf. [Figure 3](#)).

Presently, both Nico's expressive and comprehensive verbal abilities are above average, as evidenced in the verbal comprehension score (see [Table 1](#)).

His lowest scores are in processing speed and perceptual organization. Curiously enough, these are also the most lacking in the case described by Vigliano et al. (2010) in which the right hemisphere was also surgically removed, as in Nico's case. However, the fact that some of these perceptual organization tests from WAIS-III, such as 'picture completion' and 'block design', are timed should be kept in mind. We believe that Nico would have obtained better scores on these tests if there had been no time limits.

In contrast, his performance scores on the Rey-Osterrieth Complex Figure test were high in both immediate memory and delayed memory after 30 minutes (see [Table 1](#) and [Figure 4](#)).

If the figure from the Rey-Osterrieth test performed in 2011 is compared with that of 2002, it can be seen that the lines are much steadier and both the perception of the figure as a whole and the perception of the separate parts improved considerably. Equally related to this, his spelling and drawing skills also improved.

On that point, we also wish to emphasize that Nico's hobbies and work (building miniatures, painting, and fencing) require a high degree of perceptual organization.

The Stroop test results ([Table 1](#)) are rather significant inasmuch as Nico's speed in both reading the words and saying the colours is below average, but he has a good percentile score in interference. That is, Nico does not become confused when saying the colours of the ink that the names of the colours are

Table 1. Results from the tests administered to Nico (6 October 2011).

| IQ Test: WAIS III | IQ/Indices | Percentile score |
|---|------------|------------------|
| VIQ — Verbal Intelligence Quotient | 127 | 96 |
| PIQ — Performance Intelligence Quotient | 93 | 32 |
| FSIQ — Full Scale Intelligence Quotient | 112 | 79 |
| VC — Verbal Comprehension | 126 | 96 |
| PO — Perceptual Organization | 81 | 10 |
| WM — Working Memory | 98 | 45 |
| PS — Processing Speed | 63 | 0.7 |

| IQ Test: Stroop | Direct scoring | Percentile score |
|---|----------------|------------------|
| Words — W | 65 | 30 |
| Colours — C | 55 | 34 |
| Words written in different colours — CW | 38 | 42 |
| WxC/W + C = CW' | 29 | |
| CW-CW' = INTERF. | 36 | 80 |

| Perception Test: The Rey-Osterrieth Complex Figure | Direct scoring | Percentile score |
|--|-----------------|------------------|
| Copy | 36 | 99 |
| Memory | 25 | 80 |
| Copy time | 10 min. 13 sec. | 10 |

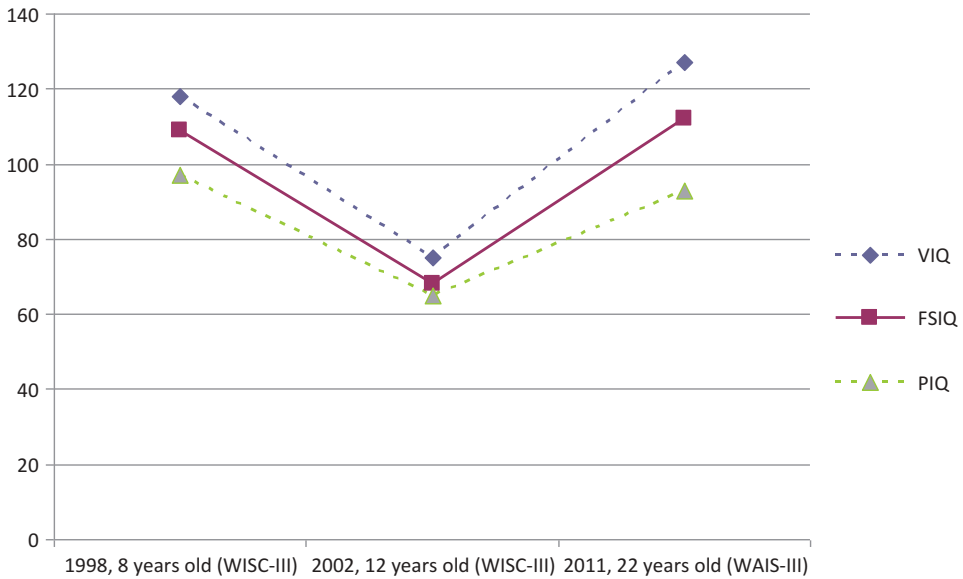


Figure 3. Nico’s IQ measured in three different time periods (Battro, 2000; Immordino-Yang, 2007). VIQ—Verbal Intelligence Quotient, FSIQ—Full Scale Intelligence Quotient, PIQ—Performance Intelligence Quotient.

Downloaded by [81.32.207.185] at 08:09 12 October 2014

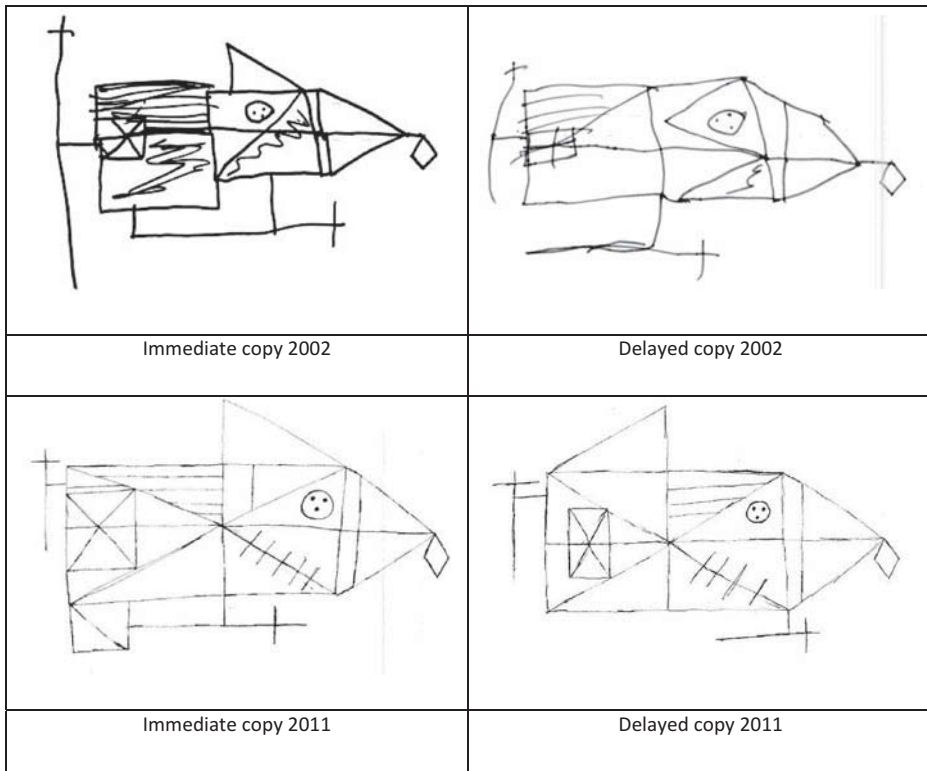


Figure 4. Copies of the Rey-Osterrieth complex figure made by Nico in 2002 and in 2011.

written in. According to information from this test, the interference effect is notable in people who have suffered brain damage. Therefore, it is rather remarkable that Nico obtained a high percentile score in this effect.

By comparing the current results on the WAIS-III with those obtained from previous results (Figure 3), we can conclude that Nico's IQ results from the first and last measurements are very similar. His lowest scores, on the measurement taken in 2002, could be attributed to different causes, such as his physical and psychological state, motivation, and the rapport established with the examiner. We cannot actually explain why these scores are lower than in the other two occasions (see Figure 3). What is evident is that in the three different measurements, Nico's score on the verbal scale is higher than the score obtained on the performance scale.

Discussion

The active compensation demonstrated in this case reveals cerebral organizational principles that go unnoticed in young people with typical development trajectories. When a person is missing areas of the brain that are required for the performance of a certain task, and they are able to successfully compensate for

that, a fantastic opportunity is presented to us for learning about cognitive compensation of basic neuropsychological abilities (Immordino-Yang, 2007).

After such a profound and substantial loss of grey and white matter resulting from the hemispherectomy, how is it possible that this young boy's development has been so successful? How has he compensated for the profound neuronal loss and what can we learn about the developing brain from this case? We will hereafter reflect upon these questions based on the goals presented in the introduction and reported below.

The brain is highly plastic

Nico achieved high scores in linguistic skills such as vocabulary and reading comprehension. In addition, he has a strong command of language, masterfully using resources such as irony and humour.

His visual-spatial perception skills are evident, not only in the test results from the Rey-Osterrieth complex figure, but also in his activities and hobbies such as fencing, painting, and assembling and designing miniatures. The combination of textures and colours in his pictures suggests a great artistic sense. His executive functions such as inhibition are also impressive, evidenced by the high score obtained in the 'interference' portion of the Stroop test.

Would it be reasonable to expect that Nico would stand out in these areas after the removal of his right hemisphere or that, for example, as in the previously described case from Vargha-Khadem et al. (1997), language would develop for the first time in a 9-year-old child with only the right hemisphere?

The idea that the two hemispheres in the human brain differ in their psychological functions has been a central theme in cognitive neuroscience for some time now. It has traditionally been thought that language processing (for the majority of right-handed people) occurs in the left hemisphere. However, research during recent decades (Curtiss et al., 2001; Liégeois et al., 2008) has shown that the right hemisphere also plays an important role in language use. Thus, an appropriate use of language includes the operation and coordination of the two hemispheres.

In contrast to the idea that language is located in the left hemisphere, the right hemisphere is known for its ability to process visual and spatial information (Laeng, Chabris, & Kosslyn, 2003), colour vision (Davidoff, 1976), and control of visual attention (Corbetta, Miezin, Shulman, & Petersen, 1993).

Thus, patients who have undergone a left hemispherectomy tend to be more affected in the area of language than right hemispherectomy patients according to the pattern of lateralization in adults (Liégeois et al., 2008), and right hemispherectomy patients obtain poorer results in spatial organization and complex task performance speed (Vigliano et al., 2010) (which was also observed in our case study with Nico's WAIS-III results). So how can we explain that Nico and other hemispherectomy patients shine in areas such as language or fencing, which are thought to be located in the hemisphere that they have had removed?

One of the most influential findings of the 20th century has been the plasticity of the brain. It was thought that each area of the brain was specific to a function

that only that particular area could perform. It is currently widely documented that neuroplasticity may explain why some people recover skills that they believed they had lost due to a lesion in a certain area. The brain can form new neural connections as a result of environmental input and at a faster rate than originally thought. Our case study, along with others discussed in this article, provides real evidence of this principle.

As we will discuss further on, experience changes the brain throughout life and a significant part of the brain's development occurs during adolescence and adulthood, not just during childhood. Even though Nico's IQ test results are similar to those obtained from the same test that he took during his childhood (Table 1 and Figure 3), his drawing and visual-spatial organizational skills have progressed considerably from his childhood up until the present time (Figure 4). According to Battro (2000), Nico's drawings from primary school were of poor quality. However, his recent pictures demonstrate great artistic sense as well as strong and well-defined lines (see Figure 2). Therefore, in this case, we could speak of a sensitive development period that lasts up until adolescence: Nico's acquisition of skills improved with the motivation that he had for working on them and, of course, with experience and practice, since he was very persistent in achieving those objectives that interested him.

In this respect, there are also good examples found in the hemispherectomy studies reviewed at the beginning of this article. In general, these cases reveal how cognitive ability is maintained at a similar level before and after surgery. Nevertheless, there are also skills that improve after the surgery despite the age of the patients. Examples of these are social and motor skills (van Empelen et al., 2005), the appearance of language at an age that is considered to be late (Vargha-Khadem et al., 1997), or the development of visual-spatial organization, attention, and working memory (Vigliano et al., 2010).

How does Nico's left hemisphere assume the functions of the right hemisphere? Or, as in the other reviewed cases, how does one hemisphere assume the functions of the other?

Immordino-Yang (2007) investigated prosody in two hemispherectomy cases (one of them was Nico's), and suggested that both cases built or adapted functions on their strongest neuropsychological zones. For example, Nico would interpret different affective tones of voice as more categorical than as emotional (memorizing acoustic characteristics and associating them with an emotional etiquette, such as yelling with anger). He would use a more categorical strategy (a function that is allegedly assumed by the left hemisphere) for dealing with emotional language (a function that is allegedly assumed by the right hemisphere).

Although the hypothesis that we just explained is interesting and deserves consideration, upon observing the automatic and natural way in which Nico interacts, by conversing and employing a sense of humour, we dare to suggest that compensation occurred because Nico's left hemisphere has been capable of assuming and fully developing right hemisphere functions. This hypothesis is reinforced by the hemispherectomy studies that have been reviewed, which also reveal how one hemisphere is capable of assuming and developing the other hemisphere's functions.

The human brain has the ability to reorganize ancient cerebral structures that are focused on very different problems, managing to recycle those structures so that they adapt to emerging cultural inventions (Dehaene, 2012). Additionally, in the reviewed cases, and in the case study presented here, we are able to show the incredible cerebral plasticity, which allows a divided brain to reconnect its structures, so that it can fully adapt itself to the demands and needs of the environment. Thus, we can conclude that brain plasticity is manifested throughout the evolution of the species (phylogenesis) as well as, and in a very marked way in the cases seen in this study, during an individual's development (ontogenesis).

Experience and learning change the brain

It is difficult to correlate the 'catastrophic' reduction of grey matter with Nico's normal cognitive, social, and emotional development. This case is remarkably exceptional. We will never know if such successful results may be due in part to individual differences in his neurological profile prior to surgery, or to the influence of experiences and learning that occurred after the intervention. In addition, Nico's immediate environment (family and school) has had, without a doubt, an important role in his development since they have always favoured his education. In this respect, the importance of an intensive rehabilitation treatment program for the improvement and development of skills in these cases is also highlighted in the hemispherectomy case study by Vigliano et al. (2010).

Many times, the relationship between heredity and environment is interpreted in a simple way, focusing on linearity or on a causal explanation for one agent over the other. The fact that the human brain is very sensitive to experience should make us consider a non-linear relationship between biology and environment (Martí, 2010).

Heredity and environment are not two opposing concepts. Fischer and Heikkinen (2010) illustrate this fact by confirming that we have great difficulty explaining complex development changes because we look for simple and linear explanations, single-agent causality, and opposing dichotomies. For example, that which is innate and that which is learned tend to be viewed as polar opposites rather than as factors that are complexly intertwined. Studying development from the 'dynamic systems' perspective proposed by these authors would mean focusing on a person throughout their entire variable life cycle and within a specific functional context.

One of the aspects that should be emphasized about the current research regarding the environment's influence on the brain is the importance that is given to well-designed, intensive, educational interventions that are sustainable over time, rather than just quick solutions (Vigliano et al., 2010). On the other hand, emphasis is currently placed on the theory that experience begins with pre-natal conditions and continues within the wide range of environments that an individual finds him/herself in during their lifetime. This places value on all of the experiences throughout one's life and not just to those occurring during the first years (Twardosz, 2012). This principle is well-reflected in our study, just as in the previously examined case studies.

Every brain, just like every face, is different

The human brain is just as unique as every face. Even though the basic structure is the same for everyone, no two brains are identical. There are general patterns of organization for how people learn and for what areas of the brain are involved in the learning process. However, each brain is unique, which implies that its organization is too. The location of functions is also distinct with respect to the place and the extension that they occupy. It should also be pointed out that the different parts of the brain do not work in isolation (Tokuhamma-Espinosa, 2010).

The response of certain functions' localized activity may vary from one person to another, and even from one test to another in the same person. It should also be added that the location of simpler cognitive functions, such as decoding, is easier to track. Nonetheless, the location of more complex processes such as the construction of meaning (which activates processing areas for meaning, syntax, semantics, narrative and textual structure, tone, prior knowledge, and emotion) varies greatly from one person to another (Hruby et al., 2011).

In addition, the brain activity of different psychological processes may be located in the same neural substrates (Martí, 2010).

Finally, the learning processes can be studied by considering different levels of analysis: biological, cognitive, and behavioural. The influence that context has in all of these should also be considered. The fact that relationships exist between these three levels of analysis is indisputable, but given the complexity of the relationships between brain, mind, and behaviour, and because of all the facts discussed in the previous paragraphs, it seems questionable to deduce excessively simple connections from one level to another.

If the multiple dimensions and levels of analysis that this process implies are not considered, the study of teaching/learning processes will present a reduced and restricted view of reality.

The case study analyzed in this article clearly reveals the idea of an existing difference in function location and organization from one brain to the next. Nico's brain is unique, just as each one of our brains is unique. However, the functions that Nico's brain performs are not so different from those of other brains, and this fact allows us to glimpse the difficulty in tracing direct and lineal relationships between the aforementioned three levels of analysis: biology, cognition, and behaviour.

The case study presented, as well as others previously described, reveal the reductionism used by popular media to interpret the findings from research on the brain.

Educational implications

Research on the brain has advanced considerably in the last 30 years. Neuroscientific studies have expanded our knowledge of the brain's chemistry and physiology. The availability of non-invasive technology to measure brain functions during cognitive tasks led to the creation of cognitive and educational neuroscience at the beginning of the 90s.

Neuroscience, psychology, and education are disciplines that do not share the same language, the same philosophy, or the same historical trajectory. Their methods and approaches to their respective objects of study are also different.

However, in spite of the difficulty in approximating these sciences, since 1998 a group of independent researchers (Dehaene, 2011; della Chiesa, Christoph, & Hinton, 2009; Fischer, Immordino-Yang, & Waber, 2007; Hruby et al., 2011; Koizumi, 2004) have been working on efforts to connect biology, cognitive science, and education. Publications on this theme continue to grow exponentially and offer different perspectives and approaches for building bridges between these disciplines. The present article seeks to contribute to this line of work, in that the main objective is to reflect and illustrate, through the detailed case study and the review of other similar cases, how neuroscientific findings can be used for education, but cannot be directly applied without bearing in mind the numerous variables impacting human development and learning.

The first principle set out was the ‘brain’s plasticity’. From an educational perspective the most important conclusions that can be taken from this principle are that learning is possible throughout a person’s entire life. The brain is capable of continuously recycling itself, and the construction of stronger and more efficient neural networks (faster recovery speed and increased transfer) in long-term memory is stimulated by the repeated activation of the circuit. This means that the practice of any skill can cause that skill to become permanent (Draganski et al., 2004; Robertson, Pascual-Leone, & Miall, 2004). In this respect, and as an example, we can refer to how Nico acquired skills that he supposedly should never have been able to perform given the loss of his right hemisphere. The plasticity of the brain throughout the entire life cycle, context opportunities, and practice made it so this became possible.

The second principle follows from the first: the appreciation of ‘the importance of context’. Context begins to play a role in an individual’s development during the prenatal stage and continues to do so throughout the entire life cycle. It is critical that education professionals understand what strategies and methods they can use for studying and improving the educational context, not only during the earliest stages of education, but also throughout life (Twardosz, 2012).

Furthermore, the brain depends on the action of the body to develop it. We learn by taking action in the world, not by simply thinking about it or listening to it. This perspective on the brain may have an important impact on education since it takes into account the physical health, nutrition, activities that are practiced, and the importance that action has on learning (Sousa, 2010).

Environment completely influences the brain’s development, to the point that the data from a neuroscience experiment cannot determine if the differences produced between the experimental and control conditions are due to neurological/genetic or instructional/environmental causes. As we have previously stated, biology and environment are intertwined in a quite complex way: they are not polar opposites, instead having a complementary influence on development. Nico has lived in a stimulant-rich context with a family that has always supported him, which has undoubtedly contributed to his

development being so optimal. But on the other hand, his genetic profile has also made learning in different areas feasible.

The third principle that we will reflect on is that each brain, just like each face, is different and unique. Just as all brains are different, a multitude of learning styles exist, defined for example by the information input preference (eye, ear, or hand), or because a certain type of intelligence is emphasized (logical-mathematical, linguistic, spatial, etc.), or by the preference for theory or practice, or for whole-to-part relation or the reverse. There are also many other variables that we could consider.

From an educational viewpoint, Immordino-Yang (2007) suggested that pupils not only approach the problems from different angles and contribute their strengths, but that by doing so, they may be transforming the problem into something new. This involves the need for educators to pay special attention to the perception that pupils have of the educational problems that they are faced with, as well as the need to design learning environments that keep these processes in mind.

Conclusions

We would like to conclude this article by highlighting the most relevant aspects. We believe that the case study presented, as well as other similar cases reviewed here, quite clearly illustrate useful principles for education: the brain is plastic and develops throughout the entire life-cycle; intensive educational interventions have a tremendous impact on human development; every human brain is different, which means that learning styles vary from one person to the next. The same resources do not work for everybody.

We would like to end by calling attention to the problem of drawing hasty and premature conclusions in areas and objects of study that are not completely known, or mastered, such as in the case of the brain and learning. While it is true that it is a fascinating area of study that we would all like to know more about and quickly extract conclusions that would help us to improve education, it is important to remember that we have yet not arrived at that point.

Nico's case, along with other similar ones, clearly demonstrates that it is not that easy to establish direct connections with education from the neuroimaging research or to generalize the findings, which should be interpreted with caution.

In the so-called area of 'education and brain science' we are still entry-level apprentices. Time and effort will undoubtedly make the relationship between these disciplines more fluid and applicable. Other experiences and cases such as the one presented here will greatly contribute to making that a reality.

Note

1. The 2002 tests were carried out by Jane Holmes-Bernstein and Celiane Rey-Casserly at Boston Children's Hospital, for the research published afterward by Immordino-Yang (2007).

Neurociencia y educación: estudio evolutivo de un caso de hemisferectomía

El interés por el cerebro y su importancia para el aprendizaje no es algo nuevo. Investigadores de diferentes disciplinas llevan casi un siglo estudiándolo y extrayendo conclusiones sobre el crecimiento y desarrollo del mismo.

Sin embargo, todos aquellos que realizaban estudios sobre el cerebro en el pasado, no tenían otro modo de observar el mismo que a través de la cirugía o la autopsia. En la autopsia, se puede aprender sobre la localización y el tamaño de estructuras cerebrales, pero no se puede conocer el cerebro en funcionamiento.

En los últimos 20 años, el conocimiento sobre el cerebro humano ha avanzado considerablemente gracias a la disponibilidad de tecnología de neuroimagen no invasiva para medir funciones cerebrales durante la realización de tareas cognitivas (ver Rodrigo, 2010).

A pesar de los avances realizados en neurociencia y educación durante los últimos años, el diálogo entre neurocientíficos y educadores, aunque necesario, es todavía escaso y complicado. Esta situación se debe a que la educación y la neurociencia son disciplinas muy diferentes y no está todavía claro cómo podrían colaborar entre sí y cómo se podrían aplicar los hallazgos de una en la otra.

El contexto de interés para un neurocientífico es el cerebro y los cambios medibles en la actividad cerebral. Como contraste, para el educador el contexto relevante es la mente y el ambiente en el que se sitúa el aprendiz. Desafortunadamente, los diferentes contextos educativos están más allá del alcance de los actuales métodos neurocientíficos ya que los estudios de neurociencia se realizan durante una duración muy limitada, en la sala donde está situado el escáner.

No obstante y a pesar de las dificultades a las que se enfrenta la neurociencia educativa, existe actualmente una corriente neurocognitiva interdisciplinaria emergente que busca integrar las distintas perspectivas sobre el cerebro (cognitivas, sociales y culturales) en el aprendizaje (Varma *et al.*, 2008).

Así lo explican Hruby, Goswami, Frederiksen, y Perfetti (2011):

Desafortunadamente el modelo computacional del cerebro es el que más a menudo se ve envuelto en los medios de comunicación y en los materiales educativos basados en el cerebro. No obstante, al mismo tiempo, está emergiendo un modelo alternativo: orgánico más que mecanicista, biológico más que representacional, construido sobre los motivos del aprendizaje como desarrollo fisiológico y fortalecido por la dinámica bioecológica de los organismos como agentes que crecen funcionalmente en respuesta a sus contingencias ecológicas y a la adaptación al ambiente a través de procesos comportamentales, de desarrollo, epigenéticos e

incluso evolutivos. La conciencia de los efectos dinámicos complejos que se suceden en el tiempo es ciertamente relevante en la investigación desde una perspectiva sociocultural y desde los modelos cognitivos (p. 168).

En este sentido, en los últimos años se han aplicado diseños innovadores con el objetivo de explicar, desde la neurociencia, efectos que el contexto puede tener en el aprendizaje (Battro, 2000; Immordino-Yang, 2007; Immordino-Yang y Faeth, 2010). Nuestro objetivo, siguiendo un diseño similar al de las investigaciones recién citadas, es presentar un estudio de caso, en un intento de ir más allá de neuromitos (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico y OCDE, 2002; Tokuhamas-Espinosa, 2010) y simplificaciones, más que a menudo engañosas, que abundan en educación, reemplazándolas por principios sobre el funcionamiento cerebral acumulados en los años de debate e investigación neurocientífica y que pueden resultar válidos y útiles para los educadores. Los principios a los que aludiremos no reflejan un único experimento o área cerebral, ya que establecer una relación directa entre estos experimentos y la educación es inapropiado y prematuro (Immordino-Yang y Faeth, 2010). En lugar de esto, reflexionaremos sobre las conclusiones de nuestro caso de estudio, que compararemos con otros casos similares, para presentar una visión neurocientífica sobre el aprendizaje, el desarrollo y el papel del contexto. Al estudiar un caso, nuestro interés se centra en desarrollar la relación entre comportamiento y cerebro, así como en el papel de la experiencia en la organización de la mente y el cerebro. En otras palabras, estamos más interesados en la reflexión de *cómo* se desarrollan diferentes funciones cerebrales que en *dónde* están localizadas.

A continuación, antes de introducir nuestro caso de estudio, presentamos investigaciones que examinan la evolución de pacientes sometidos a hemisferectomía como consecuencia de padecer epilepsia intratable. Todos estos estudios, junto con el análisis detallado de nuestro caso, servirán para ilustrar mejor los objetivos del presente trabajo.

Entre los estudios revisados se encuentran los de Curtiss, de Bode y Mathern (2001), Liégeois *et al.* (2008) y van Empelen *et al.* (2005), que estudiaron pacientes tratados tanto con hemisferectomía izquierda como derecha. Vargha-Khadem *et al.* (1997) analizaron un caso de hemisferectomía izquierda. Por último, Vigliano *et al.* (2010) presentan un caso de hemisferectomía derecha similar, en cuanto al hemisferio cerebral extirpado, al caso de estudio que presentaremos en este trabajo.

Curtiss *et al.* (2001) estudiaron la evolución y desarrollo del lenguaje en 43 pacientes hemisferectomizados, concluyendo que la extirpación del hemisferio derecho correlacionaba con mejores resultados en la habilidad lingüística solamente para el grupo de pacientes con 'patologías adquiridas', no siendo así para el grupo con 'patologías de desarrollo' (se entiende por 'patología adquirida' cuando la afección o daño de las funciones cerebrales se produce durante el desarrollo de las mismas o una vez establecidas estas y por 'patología de desarrollo' cuando el daño cerebral es previo a la aparición de la función). Como conclusión, estos

autores consideran que es más relevante para el desarrollo del lenguaje, la etiología del daño cerebral, que el lado del cerebro extirpado.

En la misma línea, Liégeois *et al.* (2008) concluyeron, en una investigación realizada a 30 pacientes tratados con hemisferectomía durante la infancia (17 izquierda y 13 derecha), que las funciones *grosso modo* del lenguaje son a menudo recuperadas después de la intervención. Parece ser que una vez que estas funciones han emergido, su desarrollo posterior es menos dependiente de la integridad de los hemisferios cerebrales. Según estos autores, tanto un hemisferio como otro, por separado, tienen potencial similar para desarrollar un nivel adecuado de vocabulario receptivo. En línea con las conclusiones del estudio anteriormente citado, este estudio apoya la tesis de que las limitaciones sustanciales del lenguaje son más bien debidas a patologías congénitas —pre/perinatales— o daño postnatal sufridos en cualquiera de los dos hemisferios, más que al hemisferio extirpado. Este estudio muestra también que la cirugía no afectó al nivel intelectual verbal ni manipulativo de los pacientes sometidos a la misma.

Van Empelen *et al.* (2005), en un estudio sobre la evolución de 12 niños a los que se les practicó hemisferectomía como consecuencia de sufrir una epilepsia intratable, concluyeron que, después de la intervención, la frecuencia y la gravedad de los ataques epilépticos disminuyeron considerablemente (en nueve de ellos las crisis epilépticas desaparecieron totalmente). Como consecuencia de la mejoría o desaparición de los ataques epilépticos, estos pacientes mejoraron en calidad de vida y en su habilidad motriz y social. La capacidad cognitiva de estos niños, medida por un test de inteligencia, no cambió y se mantuvo similar antes y después de la cirugía.

Vargha-Khadem *et al.* (1997) presentaron un caso de estudio de un niño que sufrió hemisferectomía izquierda a la edad de 8,5 años. Este niño, sorprendentemente, a la edad de 9 años comenzó a adquirir el lenguaje a pesar de no haberlo desarrollado anteriormente durante su primera infancia ya que padecía una patología (en el hemisferio izquierdo) que se lo impedía. Es interesante constatar cómo este paciente no sufrió las consecuencias negativas de su periodo anterior de mutismo y comprensión limitada. A pesar de que, tanto este caso como otros nueve tratados con hemisferectomía izquierda, presentaban limitaciones en sus capacidades lingüísticas y cognitivas, los logros conseguidos, por este niño en concreto, parecen desafiar la creencia extendida de que la niñez temprana es particularmente crítica para la adquisición del lenguaje. La conclusión de este estudio es que el desarrollo de un lenguaje apropiado, bien articulado y estructurado puede conseguirse tan tarde como a los nueve años de edad utilizando solamente el hemisferio derecho del cerebro. De algún modo, esta investigación representa también un reto para las conclusiones de los estudios previamente citados ya que, en este caso, a pesar de la patología ‘perinatal’ y tempranamente adquirida, el paciente mejoró su lenguaje inesperadamente después de la cirugía.

Por último, mostramos las conclusiones de la investigación de Vigliano *et al.* (2010) que presentan un caso de estudio de una niña tratada con hemisferectomía derecha a la edad de cinco años. Después de la cirugía desaparecieron los ataques epilépticos y cesó la toma de medicación. La transferencia de funciones del

hemisferio derecho al izquierdo sucedió muy pronto. Los autores concluyen que la cirugía realizada a una edad temprana, la plasticidad del cerebro y un tratamiento intensivo de rehabilitación, parecen ser factores importantes para determinar un resultado favorable a nivel cognitivo. Después de la cirugía se pudo comprobar un constante desarrollo de la percepción visual; sin embargo el problema de la organización visuoespacial persistía, poniendo de manifiesto, según los autores, que las funciones de representación espacial más complejas, como por ejemplo la tarea del dibujo de 'la figura compleja de Rey', parecen ser procesadas por el hemisferio derecho. El lenguaje, la habilidad mejor conservada en esta paciente, se recuperó completamente y mejoró después de un tratamiento especial que siguió a la cirugía. También mejoraron la atención y la memoria de trabajo. Los autores destacan cómo la habilidad que menos se desarrolló en este caso fue la rapidez de procesamiento en tareas complejas.

En general podríamos concluir de todos estos estudios que la cirugía parece favorecer, en un alto porcentaje de casos, la desaparición de las crisis, lo que conlleva una mejora en la calidad de vida de estos pacientes. En cuanto al lenguaje, según los estudios citados, parece ser que se recupera en la mayoría de los casos, al menos a nivel funcional, y que la etiología influye más en su recuperación que el hemisferio cerebral extirpado. Sin embargo, en este punto destaca el estudio presentado por Vargha-Khadem *et al.* (1997), ya que en este caso la adquisición del lenguaje contrasta con la edad del paciente y su etiología. También cabe destacar como conclusión, de la mayoría de estos estudios, que la cirugía no parece afectar a las funciones cognitivas, que se mantienen similares después de la misma. El estudio de Vigliano *et al.* (2010) también pone de manifiesto la dificultad en la organización espacial y la ausencia de rapidez para realizar tareas complejas en el caso analizado: los autores achacan estos problemas, en este caso, a la falta del hemisferio derecho.

Después de esta revisión, a continuación presentamos un estudio de caso de un joven, sometido a hemisferectomía derecha, con alto funcionamiento, con el objetivo de aportar posibles conexiones entre neurociencia y educación desde una perspectiva interdisciplinaria que integre el estudio sobre el cerebro, la cognición y la influencia de aspectos sociales y culturales en el aprendizaje. Aunque este caso debe interpretarse con precaución, este joven nos ofrece una ventana única a través de la que explorar los principios que gobiernan la relación entre cerebro, desarrollo y experiencia.

El primer objetivo del presente estudio es interpretar y reflexionar sobre el papel del contexto en el desarrollo y aprendizaje —a la luz del caso presentado y en comparación con los otros casos revisados— en relación a tres principios extraídos de la investigación neurocientífica: (1) el cerebro es plástico, por tanto, tiene capacidad para aprender y desarrollarse a lo largo de todo el ciclo vital, (2) la experiencia y el aprendizaje cambian el cerebro y (3) cada cerebro, como cada cara, es único y diferente.

El segundo objetivo será presentar conclusiones de carácter educativo en relación a los tres principios neurocientíficos analizados.

Método

Participante

Nico, el participante de este estudio y cuyo nombre se ha usado con su permiso, nació en Argentina, en octubre de 1989. Desde el punto de vista clínico, padecía hemiplejía congénita izquierda. No obstante, aprendió a caminar antes de los 19 meses y comenzó a hablar en frases cortas antes de los dos años. A los veintidós meses comenzó a padecer crisis epilépticas, pero la medicación no surtía ningún efecto. El incremento de las crisis, las repetidas convulsiones y la pérdida de conciencia, hicieron que su familia finalmente optara por intentar un tratamiento neuroquirúrgico. De este modo, a la edad de tres años y siete meses Nico fue sometido a una intervención de hemisferectomía del hemisferio derecho.

La técnica aplicada en el caso de Nico consistió en la extirpación de la región cortical central, el córtex parasagital y el giro cingular, más una completa lobotomía temporal, incluyendo amígdala e hipocampo. Las porciones del lóbulo frontal y lóbulos parieto-occipitales restantes fueron también desconectadas del tronco del encéfalo y del hemisferio opuesto (Battro, 2000). La [Figura 1](#) ilustra la anatomía del cerebro de Nico (en la actualidad) como resultado de la cirugía realizada. La operación fue totalmente exitosa y su mejoría inmediata: las crisis epilépticas desaparecieron y a los pocos días comenzó a caminar.

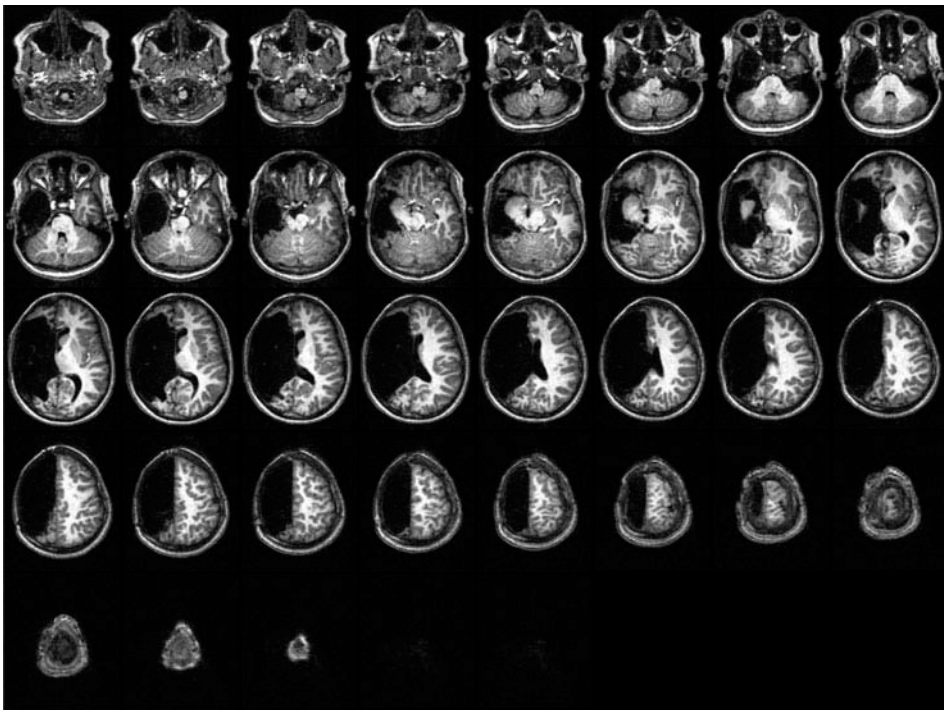


Figura 1. Imágenes en cortes axiales de la anatomía del cerebro de Nico (Noviembre 2011). Convención radiológica (la derecha aparece a la izquierda).

A principios de 2011, Nico tuvo una convulsión bastante fuerte, la primera desde su operación, casi 18 años antes. A consecuencia de ello, en la actualidad, como medida preventiva, Nico está medicado.

Desde el punto de vista social y educativo, Nico proviene de una familia de clase social media-alta siempre muy implicada en su educación. La lengua materna de Nico es el español, pero también tiene un buen nivel en inglés y es capaz de mantener una conversación en este idioma de manera relajada.

Después de la hemisferectomía, sus padres estuvieron muy pendientes de su recuperación. A la edad de cinco años comenzó una escolarización normal con la ayuda del ordenador. Durante los primeros meses de educación infantil, Nico se sentía cansado a menudo, pero se le ofrecía la oportunidad y el espacio para descansar y relajarse. De este modo su educación transcurrió de modo totalmente normal.

La educación primaria fue igualmente exitosa, siempre utilizó como cuaderno de notas un ordenador portátil con el que aprendió a escribir y a seguir el ritmo de sus compañeros. Durante la etapa de educación primaria, presentaba una gran dificultad para escribir a mano y le resultaba muy difícil formar las letras del alfabeto y los números; también estaba retrasado en dibujo con respecto a sus compañeros; sin embargo, siempre destacó en el área verbal. No obstante, y a pesar de sus dificultades, sus resultados durante la educación primaria fueron buenos (Battro, 2000).

Es interesante resaltar la progresión que Nico ha realizado en tareas como el dibujo y la pintura, y también en la escritura a mano, ya que, como hemos expuesto más arriba, sus resultados durante la educación primaria fueron pobres en estas áreas. Su psicomotricidad fina, firmeza en el trazo y sentido artístico han progresado muy favorablemente desde la etapa escolar primaria hasta la actualidad. Como ejemplo ilustrativo, en la [Figura 2](#), mostramos un cuadro realizado por Nico sobre la técnica de la esgrima.

En cuanto a su desarrollo psicomotor y físico, Nico vive en un hogar de deportistas: sus padres, dedicados al mundo del deporte, han sido sus entrenadores personales en más de un sentido. A pesar de su hemianopia y hemiplejía izquierdas, con persistencia y práctica, Nico aprendió a nadar, a jugar al tenis, a montar en bicicleta y a jugar al fútbol.

Desde el punto de vista socio-emocional, el desarrollo de Nico ha sido también totalmente normal. Siempre apoyado por su familia, tiene un marcado sentido del humor, es afectuoso y popular entre los que le rodean.

Nico terminó la escolaridad primaria en Argentina y posteriormente su familia se trasladó a Madrid, ciudad donde actualmente vive y donde realizó sus estudios de bachillerato. A los 18 años dejó sus estudios y comenzó a mostrar su talento en dos áreas: la esgrima y la pintura. Actualmente es miembro del equipo nacional de esgrima en silla de ruedas y su sueño es llegar a ser profesor de esgrima en esta categoría. El problema más aparente de Nico es que cojea ligeramente y que no puede mover con facilidad su brazo izquierdo. También padece hemianopia izquierda, aunque esto no le imposibilita realizar actividades como la lectura, la pintura o practicar esgrima.



Figura 2. Cuadro sobre la esgrima realizado por Nico.

La primera referencia escrita sobre Nico tuvo lugar cinco años después de la operación y se la debemos a Battro (2000). Posteriormente Immordino-Yang (2007) realiza su tesis doctoral y diversas publicaciones sobre este caso. Estas publicaciones fueron realizadas en lengua inglesa y hasta la fecha no existe ninguna publicación en lengua española que haya documentado el caso de Nico.

El presente trabajo fue motivado como consecuencia del seguimiento de la evolución de Nico realizado en la ‘Cognitive Neuroimaging Unit’, un laboratorio de neurociencias cognitivas cerca de París (Francia), lugar en el que uno de los autores del presente estudio trabaja actualmente.

Procedimiento

Nico tenía 22 años recién cumplidos cuando se realizó este estudio. Las pruebas que a continuación describimos, fueron realizadas, por los autores de este trabajo, de modo individual en su casa, durante dos mañanas consecutivas. Pensamos en realizar dos sesiones con el fin de evitar una sesión demasiado larga y fatigosa.

Dos de las pruebas seleccionadas para este estudio (el WAIS-III y el test de la figura compleja de Rey-Osterrieth) habían sido ya realizadas por Nico en ocasiones anteriores, por lo que nos pareció interesante realizarlas de nuevo para poder comparar los resultados actuales con los obtenidos previamente (ver sección ‘Resultados’). El test Stroop se seleccionó debido a que es una prueba neuropsicológica muy utilizada para investigar las funciones ejecutivas y la velocidad de procesamiento. Especialmente nos interesaba de esta prueba analizar el efecto de interferencia ya que, según está documentado en la misma prueba, las personas con daño cerebral tienen dificultades para realizar esta tarea.

Las pruebas se pasaron en el siguiente orden: test de la figura compleja de Rey-Osterrieth (30 minutos), test Stroop (10 minutos) y entrevista no estructurada (aproximadamente 1 hora 30 minutos) durante la primera sesión, y test WAIS-III (1 hora 30 minutos) durante la segunda.

Instrumentos

Test de la figura compleja de Rey-Osterrieth (The Rey-Osterrieth Complex Figure, ROCF). La ‘figura-compleja’ fue diseñada (Osterrieth, 1944; Rey, 1941) para investigar tanto la organización perceptual, como la memoria visual y la coordinación motora en individuos con lesión cerebral. La ejecución de este test consiste en solicitar al sujeto examinado que copie una figura compleja (desconocida para él) a mano y sin límite de tiempo, valorándose la capacidad de organización y planificación de estrategias para la resolución de problemas así como su capacidad visuconstructiva. Posteriormente, sin previo aviso y sin la ayuda del modelo, el examinado debe reproducir inmediatamente y a los 30 minutos de nuevo la misma figura, con el fin de evaluar su capacidad de recuerdo material no verbal.

Test Stroop. En psicología, se denomina efecto de Stroop a una clase de interferencia semántica en el tiempo de reacción de una tarea: cuando el nombre de un color está escrito con una tinta de un color que difiere del color expresado por el significado semántico, se produce un retraso en el procesamiento del color de la palabra, lo que aumenta el tiempo de reacción y favorece los errores (Stroop, 1935). Concretamente, la prueba consiste en mostrar al sujeto tres tarjetas de 35,5×10cm. La primera tarjeta contiene 17 nombres de colores impresos con tinta negra. La segunda, contiene 17 barras de colores, cada una de 2,6×8cm. Finalmente, la tercera tarjeta contiene 17 nombres de colores impresos con una tinta de color diferente (por ejemplo, la palabra ‘rojo’ está impresa con tinta azul) y el sujeto debe decir el color de la tinta. Las palabras y las barras están ordenadas verticalmente en cada tarjeta. Típicamente, el tiempo de lectura de la última tarjeta (la tarea de interferencia) es bastante más elevado que el de lectura de palabras de la primera tarjeta o el de nombrar colores de la segunda.

Escala de inteligencia de Wechsler (Wechsler Adults Intelligence Scale, WAIS III). En este estudio hemos utilizado la versión española de la tercera edición de la escala de inteligencia de Wechsler (1997), WAIS-III. Esta versión fue estandarizada con una muestra total de $N = 1500$ sujetos españoles adultos y se ha mostrado su buena fiabilidad y validez (Wechsler, 2001). El WAIS-III cuenta con 14 subpruebas: siete Verbales (Vocabulario, Semejanzas, Aritmética, Retención de dígitos, Información, Comprensión, Sucesión de letras y números) y siete de Ejecución (Figuras incompletas, Dígitos y símbolos, Diseño con cubos, Matrices, Ordenamiento de dibujos, Búsqueda de símbolos, Ensamble de objetos). Estas subescalas permiten obtener las tradicionales puntuaciones de CI, así como

cuatro índices: Comprensión verbal (Vocabulario, Semejanzas, Información), Organización perceptual (Figuras incompletas, Diseño con cubos, Matrices), Memoria de trabajo (Aritmética, Retención de dígitos, Sucesión de letras y números) y Velocidad de procesamiento (Dígitos y símbolos, Búsqueda de símbolos).

Entrevista no estructurada. El primer día, después de realizar las pruebas, realizamos una entrevista no estructurada a Nico. El objetivo de esta conversación era comprobar cómo se expresaba oralmente en un contexto informal y conocer sus aficiones. Las preguntas propuestas fueron ‘¿qué haces en tu tiempo libre?’ y ‘¿qué actividades te resultan más gratificantes?’. Aunque no habíamos preparado un registro previo para esta entrevista, sí recogimos y sintetizamos los datos obtenidos una vez finalizada la misma.

A continuación exponemos los datos más relevantes obtenidos en esta entrevista en relación al lenguaje y las aficiones de Nico.

En cuanto al lenguaje pudimos comprobar que sus expresiones, tanto verbales como no verbales, así como su forma de interactuar, eran totalmente apropiadas y correctas. Ninguno de los dos entrevistadores observamos ninguna dificultad en el uso del lenguaje.

En cuanto a sus aficiones, Nico nos mostró sus cuadros, su colección de miniaturas y nos contó sus planes de futuro en relación a la esgrima: actualmente es miembro del equipo nacional de esgrima en silla de ruedas y su sueño es llegar a ser profesor de esgrima en esta categoría.

Sus cuadros están realizados sobre temas de paisajes, sobre la esgrima e incluso ha pintado un autorretrato. A menudo sus cuadros tienen además un mensaje. Por ejemplo, ha pintado el retrato de Dorian Gray, y un cuadro de una silla de ruedas con una prótesis de pierna y con todo el material del esgrimista.

Nos mostró también una colección de miniaturas que se compran desmontadas y que posteriormente se montan y se decoran con pequeños pinceles y colores. El montaje de estas miniaturas requiere grandes dosis de atención, psicomotricidad fina y habilidades espaciales. Realmente Nico tiene una buena colección muy bien elaborada.

Nico colaboró con nosotros en todo momento y estuvo muy atento, mostrando un gran sentido del humor, tanto a la hora de realizar las pruebas como en la entrevista. En las pruebas realizadas se sintió muy cómodo en las de carácter verbal (vocabulario, semejanzas y comprensión) aunque algo menos en las de aritmética.

Resultados

El CI de Nico es de 112, su CI verbal es de 127 y su CI manipulativo de 93 (ver [Tabla 1](#)). Estos resultados se encuentran dentro del rango de la normalidad. Cinco años después de la hemisferectomía (Battro, 2000) el CI de Nico era de 109 (CI verbal de 118 y CI manipulativo de 97). Mientras que el CI en el 2002¹

Tabla 1. Resultados de las pruebas realizadas a Nico (6 de Octubre de 2011).

| Prueba de IQ: WAIS III | CI/índices | Puntuación centil |
|---|--------------------|-------------------|
| CIV — Cociente Intelectual Verbal | 127 | 96 |
| CIM — Cociente Intelectual Manipulativo | 93 | 32 |
| CIT — Cociente Intelectual Total | 112 | 79 |
| CV — Comprensión Verbal | 126 | 96 |
| OP — Organización Perceptiva | 81 | 10 |
| MT — Memoria de Trabajo | 98 | 45 |
| VP — Velocidad de Procesamiento | 63 | 0,7 |
| Prueba de IQ: Stroop | Puntuación directa | Puntuación centil |
| Palabras — P | 65 | 30 |
| Colores — C | 55 | 34 |
| Palabras escritas con diferente color — PC | 38 | 42 |
| PxC/P + C = PC' | 29 | |
| PC-PC' = INTERF. | 36 | 80 |
| Prueba de Percepción: The Rey-Osterrieth Complex Figure | Puntuación directa | Puntuación centil |
| Copia | 36 | 99 |
| Memoria | 25 | 80 |
| Tiempo copia | 10 min. 13 seg. | 10 |

(Immordino-Yang, 2007) era de 68 (CI verbal de 75 y CI manipulativo de 65; cf. Figura 3).

En la actualidad, la habilidad verbal de Nico, tanto expresiva como comprensiva, está por encima de la media, como podemos ver en la puntuación de comprensión verbal (ver Tabla 1).

Sus puntuaciones más bajas son en la velocidad de procesamiento y en la organización perceptiva: curiosamente las habilidades más deficitarias en el caso descrito por Vigliano *et al.* (2010) en el que también se había extirpado el hemisferio derecho, igual que en el caso de Nico. Sin embargo, debemos tener en cuenta que algunas de las pruebas de organización perceptiva del WAIS-III, como 'figuras incompletas' y 'cubos' son cronometradas. Sin limitaciones de tiempo, pensamos que Nico hubiera obtenido mejores puntuaciones en estas pruebas.

Como contraste, sus puntuaciones en la realización de la prueba perceptiva de 'The Rey-Osterrieth Complex Figure' son altas, tanto en la situación de memoria, como en la respuesta después de 30 minutos (ver Tabla 1 y Figura 4).

Si además comparamos la figura de la prueba 'Rey-Osterrieth' realizada en el 2011 con la realizada en el 2002, podemos comprobar como el trazo es mucho más estable y tanto la percepción de la figura global como la de las partes han mejorado considerablemente. A la par, y relacionado con esto, también ha mejorado su grafía y su habilidad para dibujar.

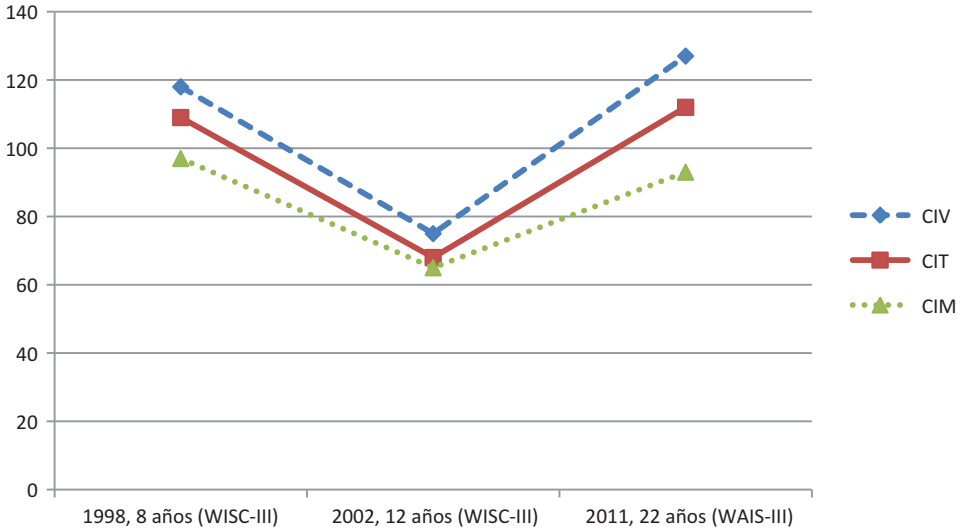


Figura 3. CI de Nico medido en tres periodos diferentes (Battro, 2000; Immordino-Yang, 2007). CIV—Cociente Intelectual Verbal, CIT—Cociente Intelectual Total, CIM—Cociente Intelectual Manipulativo.

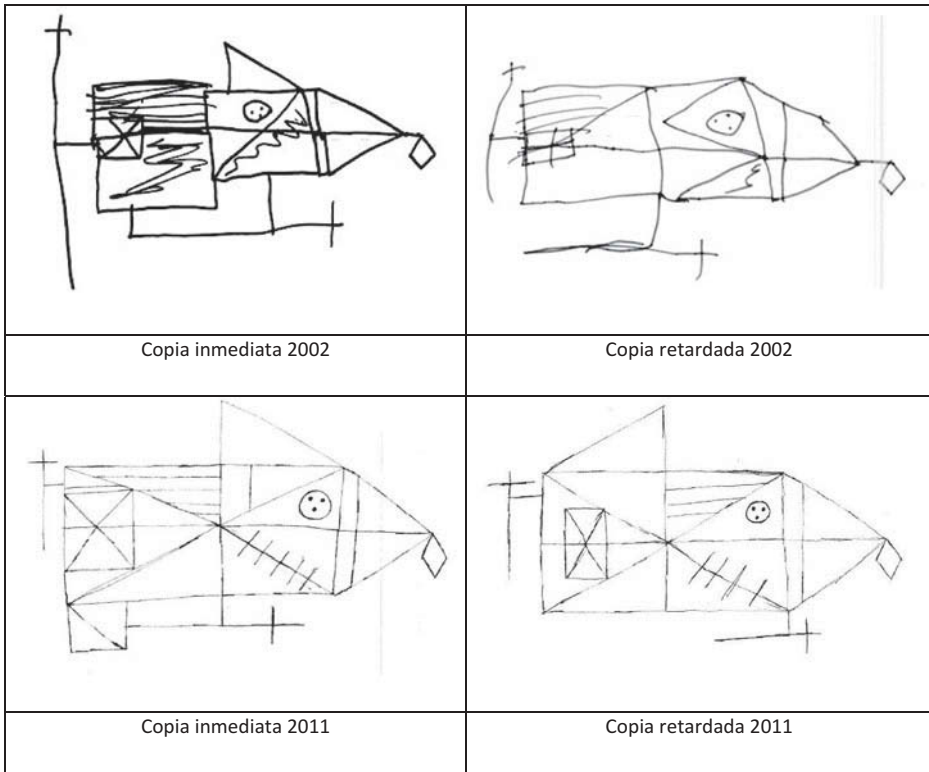


Figura 4. Copias de la figura compleja de Rey-Osterrieth realizadas por Nico en 2002 y en 2011.

También queremos destacar en este punto que las aficiones y los trabajos de Nico (construcción de miniaturas, pintura, esgrima) requieren una alta organización perceptiva.

Los resultados de la prueba de Stroop (Tabla 1) son bastante significativos ya que su velocidad tanto para leer las palabras, como para decir los colores, está por debajo de la media, pero obtiene una buena puntuación centil en interferencia. Es decir, Nico es capaz de no confundirse al decir el color de la tinta con la que están escritos los nombres de los colores. Según la información de este test, el efecto de interferencia es notable en personas con daño cerebral. Por tanto, resulta llamativo que Nico obtenga una puntuación centil alta en este efecto.

Si comparamos los resultados actuales en el WAIS-III con los obtenidos en estudios anteriores (Figura 3), podríamos concluir que los resultados de CI de Nico son muy similares en la primera y última medida. En la medida tomada en el 2002 sus puntuaciones más bajas podrían ser debidas a diferentes causas, como el estado físico y psicológico, la motivación y el 'rapport' que se establece con el examinador. En realidad no podemos explicar por qué estas puntuaciones son más bajas que en las otras dos ocasiones (ver Figura 3). Lo que sí podemos ver es que, en las tres medidas, la puntuación obtenida por Nico en la escala verbal es superior a la puntuación obtenida en la escala manipulativa.

Discusión

La activa compensación mostrada en el caso descrito pone de manifiesto principios de organización cerebral que pasan desapercibidos en jóvenes con trayectorias típicas de desarrollo. Cuando a una persona le faltan áreas del cerebro requeridas para realizar una determinada tarea, y a pesar de ello puede compensar con éxito, se nos presenta una magnífica oportunidad para aprender sobre compensación cognitiva de habilidades neuropsicológicas básicas (Immordino-Yang, 2007)

Después de una pérdida tan profunda y sustancial de materia gris y blanca, como resultado de una hemisferectomía, ¿cómo es posible que el desarrollo de este joven haya sido tan exitoso? ¿Cómo ha compensado la profunda pérdida neuronal y qué podemos aprender de este caso sobre el cerebro en desarrollo? A continuación reflexionaremos sobre estas preguntas en base a los objetivos planteados en la introducción y que a continuación exponemos.

El cerebro es plástico

Nico obtiene altas puntuaciones en habilidades lingüísticas, como el vocabulario y la comprensión lectora. Además usa el lenguaje con un gran dominio, utilizando con maestría recursos como la ironía y el sentido del humor.

Sus habilidades perceptivo-espaciales quedan patentes, no sólo en los resultados del test de la figura compleja de Rey-Osterrieth, sino también en sus ocupaciones y hobbies, como la esgrima, la pintura, el montaje y diseño de miniaturas. Sus cuadros dejan entrever un gran sentido artístico en la combinación de texturas

y colores. Destaca también en funciones ejecutivas, como la inhibición, mostrada en la alta puntuación obtenida en ‘interferencia’ en la realización del test Stroop.

¿Cabría esperar que Nico destaque en todas estas áreas después de la extirpación de su hemisferio derecho o que, por ejemplo, el caso descrito por Vargha-Khadem *et al.* (1997), anteriormente presentado, desarrollase por primera vez el lenguaje a la edad de nueve años solamente con el hemisferio derecho?

La idea de que los dos hemisferios en el cerebro humano difieren en sus funciones psicológicas ha sido desde hace tiempo un tema central en la neurociencia cognitiva. Tradicionalmente se ha considerado que el procesamiento del lenguaje (para la mayoría de las personas diestras) ocurre en el hemisferio izquierdo. Sin embargo, la investigación en las últimas décadas (Curtiss *et al.*, 2001; Liégeois *et al.*, 2008) ha mostrado que el hemisferio derecho también juega un importante papel en el uso del lenguaje. De este modo, un adecuado uso del lenguaje incluye la operación y coordinación de los dos hemisferios.

Como contrapunto a la idea de que el lenguaje está localizado en el hemisferio izquierdo, el hemisferio derecho es conocido por su habilidad para procesar información visual y espacial (Laeng *et al.*, 2003), la visión en color (Davidoff, 1976) y el control de la atención visual (Corbetta *et al.*, 1993).

Así, los pacientes sometidos a hemisferectomía izquierda suelen estar más afectados en el lenguaje que los pacientes sometidos a hemisferectomía derecha, según el patrón adulto de lateralización (Liégeois *et al.*, 2008), y los pacientes sometidos a hemisferectomía derecha obtienen peores resultados en la organización espacial y en la rapidez para realizar tareas complejas (Vigliano *et al.*, 2010) (lo que también se observa en nuestro caso de estudio con los resultados de Nico en el WAIS-III). Sin embargo, ¿cómo podríamos explicar que Nico y otros pacientes hemisferectomizados destaquen en áreas, como lenguaje o esgrima, que se piensa están localizadas en el hemisferio que les ha sido extirpado?

Uno de los hallazgos más influyentes del siglo XX ha sido la plasticidad del cerebro. Se pensaba que cada área del cerebro estaba especializada en una función que solamente esa área podía desempeñar. Actualmente está ampliamente documentado que la neuroplasticidad puede explicar por qué algunas personas recuperan habilidades que se creían perdidas como consecuencia de una lesión en un área determinada. El cerebro puede reconectarse a sí mismo como resultado del ‘input’ ambiental y a un paso más rápido del que originalmente se pensaba. El caso que nos ocupa, y otros descritos en este artículo, son una prueba patente de este principio.

Como discutiremos más abajo, la experiencia modifica el cerebro durante toda la vida y una parte significativa del desarrollo cerebral ocurre durante la adolescencia y la edad adulta y no solamente durante la niñez. Aunque los resultados en la capacidad intelectual de Nico son similares a los obtenidos en el mismo test durante su infancia (Tabla 1 y Figura 3), su dibujo y organización visuoespacial han evolucionado considerablemente desde su niñez hasta la época actual (Figura 4). Según relata Battro (2000), sus dibujos eran de poca calidad durante la escuela primaria. Sin embargo, actualmente sus

cuadros muestran una gran sensibilidad artística y un trazo seguro y bien definido (ver [Figura 2](#)). Por tanto, en este caso, podríamos hablar de un periodo sensible de desarrollo que se dilata hasta la adolescencia: la adquisición de habilidades mejora con la motivación que Nico siente hacia las mismas y, por supuesto, con la experiencia y la práctica, ya que Nico es muy persistente para conseguir aquellos objetivos que le interesan.

En este sentido, encontramos también buenos ejemplos en los estudios de hemisferectomía revisados más arriba. En general, estos casos ponen de manifiesto cómo la habilidad cognitiva se mantiene a un nivel similar antes y después de cirugía. No obstante, hay habilidades que mejoran después de la cirugía a pesar de la edad de los pacientes. Ejemplo de ello son las habilidades sociales y motrices (van Empelen *et al.*, 2005), la aparición del lenguaje a una edad considerada tardía (Vargha-Khadem *et al.*, 1997) o el desarrollo de la organización visuoespacial, atención y memoria de trabajo (Vigliano *et al.*, 2010).

¿Cómo aprende el hemisferio izquierdo de Nico a asumir funciones del hemisferio derecho? O, en los otros casos revisados, ¿cómo aprende un hemisferio a asumir las funciones del otro?

Immordino-Yang (2007) investigó la prosodia en dos casos de hemisferectomía (uno de ellos era Nico), y sugirió que ambos construían o adaptaban funciones sobre sus zonas neuropsicológicas más fuertes. Por ejemplo, Nico estaría interpretando diferentes tonos afectivos de voz como categóricos más que como emocionales (memorizando características acústicas y asociándolas con una etiqueta emocional, como gritos con enfado), utilizaría una estrategia más categórica (función que supuestamente es asumida por el hemisferio izquierdo) para enfrentarse al procesamiento del lenguaje emocional (función que supuestamente es asumida por el hemisferio derecho).

Aunque la hipótesis que acabamos de exponer es interesante y merece ser considerada, nosotros, al observar el modo tan automático y tan natural con el que Nico interacciona, conversa y utiliza el sentido del humor, nos atrevemos a sugerir que la compensación se produce porque el hemisferio izquierdo de Nico ha sido capaz de asumir y desarrollar plenamente funciones del hemisferio derecho. Esta hipótesis se ve reforzada por los estudios de hemisferectomía revisados, que ponen también de manifiesto cómo un hemisferio es capaz de asumir y desarrollar funciones del otro.

El cerebro humano tiene la capacidad de reconvertir antiguas estructuras cerebrales, enfocadas hacia objetivos muy diferentes, logrando reciclarse, para adaptarse a la gran explosión de inventos culturales (Dehaene, 2012). Pero además, en los casos revisados y en el caso de estudio presentado, podemos comprobar la gran plasticidad cerebral que permite que un cerebro seccionado sea capaz de reconectar sus estructuras para adaptarse plenamente a las demandas y exigencias del medio. Así, podemos concluir que la plasticidad cerebral se manifiesta tanto a lo largo de la evolución de la especie (filogénesis) como, y de modo muy marcado en los casos tratados en este estudio, durante el desarrollo del individuo (ontogénesis).

La experiencia y el aprendizaje cambian el cerebro

Es difícil correlacionar la ‘catastrófica’ reducción de materia gris con el desarrollo cognitivo, social y afectivo normal de Nico. Este caso es extremadamente excepcional y nunca sabremos si los resultados tan exitosos pueden ser debidos, en parte, a su diferencia individual en su perfil neurológico previo a la cirugía o a la influencia de la experiencia y aprendizaje posterior a la intervención. Porque además, en el caso de Nico, su entorno más cercano (familia y escuela) ha tenido, sin lugar a dudas, un papel importante en su mejoría ya que siempre han favorecido su educación. En este sentido, en el estudio de caso de hemisferectomía presentado por Vigliano *et al.* (2010), también se resalta la importancia de un tratamiento intensivo de rehabilitación para la mejora y desarrollo de habilidades en estos casos.

En muchas ocasiones se interpreta la relación entre herencia y ambiente de un modo simple, enfocado en la linealidad o en la explicación causal de un agente sobre otro. El hecho de que el cerebro humano es muy sensible a la experiencia debe hacernos reflexionar sobre una relación entre biología y ambiente no lineal (Martí, 2010).

Herencia y ambiente no son dos conceptos contrapuestos. Fischer y Heikkinen (2010) ilustran bien este hecho constatando que tenemos grandes dificultades para explicar cambios del desarrollo complejos porque buscamos explicaciones simples y lineales, explicaciones causales de un agente único, y en dicotomías opuestas. Por ejemplo, lo innato y lo aprendido se tienden a ver como dos polos opuestos más que como factores que se entrelazan de modo complejo. Desde el punto de vista de ‘sistemas dinámicos’, propuesto por estos autores, el desarrollo se centraría en el estudio de la persona a lo largo de todo su ciclo vital en toda su variabilidad y en un contexto funcional específico.

Uno de los aspectos que podemos destacar de la investigación actual sobre la influencia del ambiente en el cerebro es la importancia que se le da a las intervenciones educativas intensivas bien diseñadas y duraderas en el tiempo, más que a soluciones rápidas (Vigliano *et al.*, 2010). Por otro lado, actualmente se resalta que la experiencia comienza con las condiciones prenatales y continúa con el amplio rango de entornos que el individuo encuentra durante toda su vida, dando, de este modo, valor a todas las experiencias a lo largo de su ciclo vital y no sólo a aquellas que se producen durante los primeros años (Twardosz, 2012). Este principio queda bien reflejado tanto en nuestro caso de estudio, como en los casos de estudio revisados.

Cada cerebro, como cada cara, es diferente

El cerebro humano es tan único como la cara. Mientras que la estructura básica es la misma, no hay dos cerebros idénticos. Existen patrones generales de organización sobre cómo las personas aprenden y qué áreas del cerebro están implicadas en el aprendizaje. Sin embargo cada cerebro es único y también su organización. La localización de funciones también es diferente en cuanto al lugar

y a la extensión que ocupan. Además conviene recordar que las diferentes partes del cerebro no trabajan aisladamente (Tokuhama-Espinosa, 2010).

La respuesta de la actividad localizada de ciertas funciones, puede variar de una persona a otra, e incluso de una prueba a otra en la misma persona. Además hay que añadir que la localización de procesos cognitivos más simples, como la decodificación, es más fácil de rastrear. No obstante, la localización de procesos más complejos como la construcción de significado (que activa áreas de procesamiento del significado, de la sintaxis, semánticas, de la estructura narrativa y textual, del tono, del conocimiento previo y de la emoción) varía mucho de una persona a otra (Hruby *et al.*, 2011).

Además, la actividad cerebral de diferentes procesos psicológicos podría estar localizada en los mismos sustratos neuronales (Martí, 2010).

Por último, los procesos de aprendizaje pueden ser estudiados considerando diferentes niveles de análisis: biológico, cognitivo y conductual. Habría también que considerar la influencia que el contexto tiene en todos ellos. El hecho de que existen relaciones entre estos tres niveles de análisis es indiscutible pero, dada la complejidad de las relaciones entre cerebro, mente y comportamiento y por todo lo expuesto en los párrafos anteriores, parece cuestionable deducir correspondencias excesivamente simples de un nivel a otro.

Mientras el estudio de los procesos de enseñanza/aprendizaje no considere las múltiples dimensiones y niveles de análisis que este proceso implica, presentará una visión reducida y restringida de la realidad.

El caso de estudio analizado en este trabajo pone claramente de manifiesto la idea de la diferencia de estructura y organización de un cerebro a otro. El cerebro de Nico es único, igual que el cerebro de cada uno de nosotros. Sin embargo, las funciones que el cerebro de Nico realiza no son tan diferentes a las que realizan otros cerebros y este hecho deja entrever la dificultad de trazar relaciones directas y lineales entre los tres niveles de análisis anteriormente mencionados: biología, mente y conducta.

El caso de estudio presentado, así como otros descritos en las investigaciones anteriormente presentadas, ponen de manifiesto el reduccionismo con el que muchas veces, en los medios populares de comunicación y en otros ámbitos, se interpretan los hallazgos de experimentos sobre el estudio del cerebro.

Implicaciones educativas

En los últimos 30 años la investigación sobre el cerebro ha avanzado considerablemente. Los estudios de neurociencia han expandido nuestro conocimiento de la química y fisiología del cerebro. La disponibilidad de tecnología no invasiva para medir funciones cerebrales durante tareas cognitivas ha llevado a la creación de la neurociencia cognitiva y educativa a principios de la década de los 90.

Neurociencia, psicología y educación son disciplinas que no comparten el mismo lenguaje, ni la misma filosofía, ni la misma trayectoria histórica. Su método y aproximación a sus respectivos objetos de estudio es también diferente.

Sin embargo, a pesar de la dificultad que entraña aproximar estas ciencias, desde 1998, grupos de investigadores independientes (Dehaene, 2011; della Chiesa, Christoph y Hinton, 2009; Fischer, Immordino-Yang y Waber, 2007; Hruby *et al.*, 2011; Koizumi, 2004) vienen realizando esfuerzos para conectar biología, ciencia cognitiva y educación. Las publicaciones sobre este tema continúan creciendo exponencialmente y se trabaja desde diferentes perspectivas y aproximaciones para tender puentes entre estas disciplinas. El presente artículo pretende contribuir en esta línea, ya que su principal objetivo es reflexionar e ilustrar, a través del estudio detallado de un caso y la revisión de otros casos similares, sobre cómo los hallazgos neurocientíficos son útiles para la educación pero no se pueden aplicar directamente sin tener en cuenta las múltiples variables que inciden en el desarrollo y aprendizaje humano.

El primer principio planteado ha sido la ‘plasticidad cerebral’. Desde un punto de vista educativo, las conclusiones más importantes que podríamos extraer de este principio son que el aprendizaje es posible a lo largo de todo el ciclo vital, ya que el cerebro es capaz de reciclarse continuamente, y que la construcción de redes más fuertes y eficientes (mayor velocidad de recuperación y mayor transferencia) en la memoria a largo plazo es estimulada por la activación repetida del circuito. Esto quiere decir que la práctica de cualquier habilidad puede hacer que ésta se convierta en permanente (Draganski *et al.*, 2004; Robertson *et al.*, 2004). En este sentido, y como ejemplo, nos podemos referir a cómo Nico ha adquirido habilidades que supuestamente nunca podría haber realizado dada la pérdida de su hemisferio derecho. La plasticidad cerebral a lo largo de todo el ciclo vital, las oportunidades del contexto y la práctica hicieron que, en el caso descrito, esto fuera posible.

De este primer principio se extraería el segundo: la apreciación de ‘la importancia del contexto’. El contexto comienza a actuar en el desarrollo de un individuo desde la etapa prenatal y continúa haciéndolo a lo largo de todo el ciclo vital. Es crítico que los profesionales de la educación comprendan qué estrategias y métodos pueden utilizar para el estudio y la mejora del contexto educativo, no sólo durante las primeras etapas educativas, sino durante toda la vida (Twardosz, 2012).

Todavía más, el cerebro depende de la acción del cuerpo para desarrollarse. Aprendemos actuando sobre el mundo, no simplemente pensando sobre él o escuchando sobre él. Esta perspectiva sobre el cerebro puede repercutir en la educación de modo importante, ya que toma en consideración la salud física, la nutrición, la práctica de actividades y la importancia de la acción para el aprendizaje (Sousa, 2010).

El ambiente influye totalmente en el desarrollo del cerebro, hasta el punto que los datos de un experimento de neurociencia no pueden determinar si las diferencias entre la condición experimental y la control son producidas por causas neurológicas/genéticas o instruccionales/ambientales. Como hemos comentado anteriormente, biología y ambiente se entrelazan de modo complejo: no son dos polos opuestos, su influencia en el desarrollo es complementaria. Nico ha vivido

en un contexto rico en estímulos, con una familia que le ha apoyado siempre y que, sin lugar a dudas, ha contribuido a que su desarrollo haya sido óptimo. Pero también, por otro lado, su perfil genético ha posibilitado que el aprendizaje en diferentes ámbitos haya sido factible.

El tercer principio sobre el que reflexionamos es que cada cerebro, como cada cara, es diferente. Igual que todos los cerebros son diferentes, existen multitud de estilos de aprendizaje, definidos, por ejemplo, por la preferencia del 'input' de la información (ojo, oído o mano), o porque destaca algún tipo de inteligencia (lógico-matemática, lingüística, espacial, etc.), o por la preferencia por la teoría o la práctica, o por ir del todo a las partes, o al revés y así podríamos considerar muchas otras variables.

Desde el punto de vista educativo, Immordino-Yang (2007) sugiere que los aprendices no solamente se aproximan a los problemas desde diferentes ángulos y aportan sus fortalezas, sino que de hecho pueden estar transformando el problema en algo nuevo. Esto implica la necesidad de que los educadores presten atención especial a la percepción que tienen los aprendices de los problemas educativos que se les presentan, así como a la necesidad de diseñar entornos de aprendizaje que tengan en cuenta estos procesos.

Conclusiones

Nos gustaría concluir este trabajo resaltando los aspectos más relevantes. Pensamos que el caso de estudio presentado, así como otros similares revisados en este trabajo, ilustran con bastante claridad principios que son útiles para la educación: el cerebro es plástico y se desarrolla a lo largo de todo el ciclo vital; los tratamientos educativos intensivos tienen un gran impacto sobre el desarrollo humano; cada cerebro humano es diferente, por tanto el estilo de aprendizaje cambia de un aprendiz a otro. Los mismos recursos no sirven para todos.

Queremos finalizar con una llamada de atención sobre la extracción de conclusiones demasiado rápidas y precipitadas en áreas y objetos de estudio no totalmente conocidos, ni dominados, como es el caso del cerebro y el aprendizaje humano. Si bien es cierto que es un área de estudio fascinante sobre la que todos quisiéramos conocer más y extraer conclusiones rápidas que nos ayudasen a mejorar la educación, hay que considerar que todavía no estamos en ese punto.

El caso descrito y otros similares ponen claramente de manifiesto que no es tan fácil establecer correspondencias directas a la educación de los experimentos de neuroimagen ni generalizar sobre los hallazgos encontrados, que se deben interpretar con precaución.

En la denominada 'ciencia del cerebro y la educación' somos todavía aprendices de nivel inicial. Sin duda, el esfuerzo y el tiempo harán que la relación entre estas disciplinas sea más fluida y aplicable. Otras experiencias y casos como el aquí tratado contribuirán a que esto ocurra.

Nota

1. Las pruebas del 2002 fueron realizadas por Jane Holmes-Bernstein y Celiane Rey-Casserly en el Boston Children's Hospital, para la investigación publicada posteriormente por Immordino-Yang (2007).

Acknowledgements / Agradecimientos

Our most sincere gratitude goes out to Nico and his family for their participation and collaboration, which made this study possible. Thank you also to Antonio Battro and Stanislas Dehaene for having inspired this study. / *Nuestro más sincero agradecimiento a Nico y a su familia por su participación y colaboración para que este estudio haya sido posible. Gracias también a Antonio Battro y a Stanislas Dehaene por haber motivado este trabajo.*

References / Referencias

- Battro, A. (2000). *Half a brain is enough: The story of Nico*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Corbetta, M., Miezin, F. M., Shulman, G. L., & Petersen, S. E. (1993). A PET study of visuospatial attention. *Journal of Neuroscience*, *13*, 1202–1226.
- Curtiss, S., de Bode, S., & Mathern, G. W. (2001). Spoken language outcomes after hemispherectomy: Factoring in etiology. *Brain and Language*, *79*, 379–396. doi:10.1006/brln.2001.2487
- Davidoff, J. (1976). Hemispheric sensitivity differences in the perception of colour. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *28*, 387–394. doi:10.1080/14640747608400565
- Dehaene, S. (2011). *Apprendre à lire. Des sciences cognitives à la salle de classe*. Paris: Odile Jacob.
- Dehaene, S. (2012). Cuando el reciclaje neuronal prolonga la hominización. In S. Lipina & M. Sigman (Eds.), *La pizarra de Babel* (pp. 91–105). Buenos Aires: Libros del Zorzal.
- della Chiesa, B., Christoph, V., & Hinton, C. (2009). How many brains does it take to build a new light: Knowledge management challenges of a trans-disciplinary project. *Mind, Brain, and Education Journal*, *3*, 17–26. doi:10.1111/j.1751-228X.2008.01049.x
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training. *Nature*, *427*, 311–312. doi:10.1038/427311a
- Fischer, K. W., & Heikkinen, K. (2010). The future of educational neuroscience. In D. A. Sousa (Ed.), *Mind, brain, and education: Neuroscience implications for the classroom* (pp. 248–269). Bloomington, IN: Solution Tree Press.
- Fischer, K. W., Immordino-Yang, M. H., & Waber, D. (2007). Toward a grounded synthesis of mind, brain, and education for reading disorders: An Introduction to the field and this book. In K. W. Fischer, J. H. Bernstein & M. H. Immordino-Yang (Eds.), *Mind, brain and education in reading disorders* (pp. 3–15). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hruby, G. G., Goswami, U., Frederiksen, C. H., Perfetti, C. A. (2011). Neuroscience and reading: A review for reading education researchers. *Reading Research Quarterly*, *46*, 156–172. doi:10.1598/RRQ.46.2.4
- Immordino-Yang, M. H., & Faeth, M. (2010). The role of emotion and skilled intuition in learning. In D. A. Sousa (Ed.), *Mind, brain, and education: Neuroscience implications for the classroom* (pp. 66–81). Bloomington, IN: Solution Tree Press.

- Immordino-Yang, M. H. (2007). A tale of two cases: Lessons for education from the study of two boys living with half their brains. *Mind, Brain, and Education*, 1, 66–83. doi:10.1111/j.1751-228X.2007.00008.x
- Koizumi, H. (2004). The concept of ‘developing the brain’: A new natural science for learning and education. *Brain and Development*, 26, 434–441. doi:10.1016/j.braindev.2003.09.011
- Laeng, B., Chabris, C. F., & Kosslyn, S. M. (2003). Asymmetries in encoding spatial relations. In R. Davidson & K. Hugdahl (Eds.), *The Asymmetrical Brain* (pp. 303–339). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Liégeois, F., Cross, J. H., Polkey, C., Harkness, W., & Vargha-Khadem, F. (2008). Language after hemispherectomy in childhood: Contributions from memory and intelligence. *Neuropsychologia*, 46, 3101–3107. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2008.07.001
- Martí, E. (2010). Reductionism’s long shadow: Commentary on “Where developmental psychology and neuroscience meet: A threatening or a felicitous encounter?” by María-José Rodrigo. *Infancia y Aprendizaje*, 33, 25–28. doi:10.1174/021037010790317298
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE. (2002). *La comprensión del cerebro. Hacia una nueva ciencia del aprendizaje*. Madrid: Editorial Aula XXI, Santillana.
- Osterrieth, P. A. (1944). Le test de copie d’une figure complexe: Contribution à l’étude de la perception et de la mémoire. *Archives De Psychologie*, 30, 286–356.
- Rey, A. (1941). L’examen psychologique dans les cas d’encephalopathie traumatique (Les problèmes). *Archives De Psychologie*, 28, 215–285.
- Robertson, E. M., Pascual-Leone, A., & Miall, R. C. (2004). Opinion: Current concepts in procedural consolidation. *Nature Reviews. Neuroscience*, 5, 576–582. doi:10.1038/nrn1426
- Rodrigo, M. J. (2010). Where developmental psychology and neuroscience meet: A threatening or a felicitous encounter? *Infancia Y Aprendizaje*, 33, 3–17. doi:10.1174/021037010790317252
- Sousa, D. A. (2010). How science meet pedagogy. In D. A. Sousa (Ed.), *Mind, Brain, and Education: Neuroscience Implications for the Classroom* (pp. 9–24). Bloomington, IN: Solution Tree Press.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643–662. doi:10.1037/h0054651
- Tokuhama-Espinosa, T. (2010). *Mind, brain, and education science: A comprehensive guide to the new brain-based teaching*. New York: Norton.
- Twardosz, S. (2012). Effects of Experience on the brain: The role of neuroscience in early development and education. *Early Education and Development*, 23, 96–119. doi:10.1080/10409289.2011.613735
- van Empelen, R., Jennekens-Schinkel, A., Gorter, J. W., Volman, M. J., van Nieuwenhuizen, O., & Helders, P. J. (2005). Epilepsy surgery does not harm motor performance of children and adolescents. *Brain*, 128, 1536–1545. doi:10.1093/brain/awh499
- Vargha-Khadem, F., Carr, L. J., Isaacs, E., Brett, E., Adams, C., & Mishkin, M. (1997). Onset of speech after left hemispherectomy in a nine-year-old boy. *Brain*, 120, 159–182. doi:10.1093/brain/120.1.159
- Varma, S., McCandliss, B. D., & Schwartz, D. L. (2008). Scientific and pragmatic challenges for bridging education and neuroscience. *Educational Researcher*, 37, 140–152. doi:10.3102/0013189X08317687
- Vigliano, P., Margary, G., Bagnasco, I., & Jarre, L. (2010). Cognitive evolution of a girl submitted to right hemispherotomy when five years old. *Brain and Development*, 32, 579–582. doi:10.1016/j.braindev.2009.07.010

- Wechsler, D. (1997). *Wechsler adult intelligence scale—third edition*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (2001). *WAIS-III: Escala de Inteligencia de Wechsler para Adultos—III*. Madrid: TEA Ediciones.