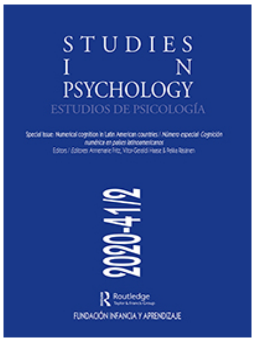

Studies in Psychology
Estudios de Psicología

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: https://www.tandfonline.com/loi/redp20

Numerical skills and dyscalculia. From basic research to practice in Cuba (*Habilidades numéricas y discalculia. De la investigación básica a la práctica en Cuba*)

Vivian Reigosa-Crespo , Danilka Castro-Cañizares , Nancy Estévez-Pérez , Elsa Santos , Rosario Torres , Raysil Mosquera , Aymeé Álvarez , Belkis Recio , Eduardo González , Valeska Amor , Marlis Ontivero & Mitchell Valdés-Sosa

To cite this article: Vivian Reigosa-Crespo , Danilka Castro-Cañizares , Nancy Estévez-Pérez , Elsa Santos , Rosario Torres , Raysil Mosquera , Aymeé Álvarez , Belkis Recio , Eduardo González , Valeska Amor , Marlis Ontivero & Mitchell Valdés-Sosa (2020) Numerical skills and dyscalculia. From basic research to practice in Cuba (*Habilidades numéricas y discalculia. De la investigación básica a la práctica en Cuba*), Studies in Psychology, 41:2, 373-403, DOI: 10.1080/02109395.2020.1749502

To link to this article: https://doi.org/10.1080/02109395.2020.1749502

Published online: 18 Jun 2020.

STUDIES IN PSYCHOLOGY / ESTUDIOS DE PSICOLOGÍA
2020, VOL. 41, NO. 2, 373–403
https://doi.org/10.1080/02109395.2020.1749502

Numerical skills and dyscalculia. From basic research to practice in Cuba (*Habilidades numéricas y discalculia. De la investigación básica a la práctica en Cuba*)

Vivian Reigosa-Crespo [a,f], Danilka Castro-Cañizares [b,c], Nancy Estévez-Pérez [d], Elsa Santos [d], Rosario Torres [d], Raysil Mosquera [d], Aymeé Álvarez [e], Belkis Recio [d], Eduardo González [d], Valeska Amor [d], Marlis Ontivero [d] and Mitchell Valdés-Sosa [d]

[a]Instituto Nacional de Evaluación Educativa (INEEd); [b]Centro de Investigación Avanzada en Educación (CIAE), Universidad de Chile; [c]Escuela de Psicología, Universidad Mayor de Chile; [d]Centro de Neurociencias de Cuba; [e]The University of Western Ontario; [f]Universidad Católica de Uruguay

ABSTRACT

Establishing bridges between the findings from cognitive neurosciences and teaching practice has not been systematically achieved. However, many researchers interested in this area agree on the positive impact that knowledge on how the brain learns has on teaching practices and educational policies. For more than 15 years, the Laboratory for Educational Neurosciences from the Cuban Centre for Neurosciences has collected evidence on basic numerical capacities and their association with learning mathematics, taking into account different levels of analysis that consider biology, cognition and education. Researchers in this laboratory have developed a conceptual, methodological and instrumental platform based on the experimental evidence they have systematically obtained. This platform has resulted in the design and validation of tools and resources for learning mathematics in the classroom with the intervention of the teachers.

ARTICLE HISTORY
Received 9 November 2019
Accepted 27 January 2020

KEYWORDS
basic numerical capacities; learning; mathematics; developmental dyscalculia; neurosciences; education

PALABRAS CLAVE
capacidades numéricas básicas; aprendizaje; matemáticas; discalculia del desarrollo; neurociencias; educación

RESUMEN

Establecer puentes entre los hallazgos de las neurociencias cognitivas y la práctica docente es un propósito que no ha logrado ser concretado de forma sistemática. Sin embargo, muchos investigadores interesados en la temática concuerdan en el impacto positivo del conocimiento acerca de cómo el cerebro aprende sobre las prácticas docentes y las políticas educativas. Durante más de 15 años, el laboratorio de Neurociencias Educacionales del Centro de Neurociencias de Cuba ha obtenido un cuerpo de evidencias acerca de las capacidades numéricas básicas y su relación con el aprendizaje de las matemáticas, focalizándose en las relaciones entre los niveles biológico, cognitivo y educacional. Investigadores de este laboratorio han desa-rrollado una plataforma conceptual, metodológica e instrumental basada en las

CONTACT Vivian Reigosa-Crespo vreigosac@gmail.com Instituto Nacional de Evaluación Educativa (INEEd), Montevideo, Uruguay.

English version: pp. 373–386 / *Versión en español*: pp. 387–400
References / *Referencias*: pp. 401–403
Translation from Spanish / *Traducción del español*: Liza D'Arcy

evidencias experimentales que han obtenido de manera sistemática. Dicha plataforma ha dado lugar a la creación y validación de herramientas y recursos para la atención al desarrollo de la neurocognición numérica en la clase con la intervención del maestro.

The numerical system. The interaction between the biological, cognitive and educational levels

According to current theories on typical cognitive development, the acquisition of knowledge is based on a limited set of nuclear systems defined by primary representations from specific domains that lead and constrain the cultural acquisition of new, higher-level representations. Kinzler and Spelke (2007) define the numerical system as one of these nuclear systems, and state that it is responsible for the basic processing of numerical quantities.

Some studies have evidenced the innate character of this system (Hart, Petrill, & Thompson, 2010; Kovacs et al., 2007). Its functioning can be observed in pre-verbal children (Gelman & Meck, 1983; Lipton & Spelke, 2003; Wynn, 1992; Xu & Spelke, 2000) and even in animals (Nieder, 2005; Nieder & Miller, 2004), as well as in populations from cultures without numbers (Butterworth, Reeve, Reynol, & Lloyd, 2008; Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004). On the other hand, evidence from neuroimaging studies shows that the processes underlying the operations with the numerical representations have neural correlates circumscribed to the inferior and superior parietal lobe, and more specifically to the horizontal segment of the intraparietal sulcus of both brain hemispheres (see meta-analysis by Arsalidou & Taylor, 2010).

There are two different hypotheses regarding the innate bases of this numerical system. One states that young children have a *numerical module* that allows them to construct concepts on the exact numerosity of sets (Butterworth, 1999; Gelman & Gallistel, 1978). The other view suggests that human babies and many animals are equipped with a 'sense' of approximate numbers, or an Approximate Number System (ANS) (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004), on which the concepts of exact numbers are constructed with language support (Lemer, Dehaene, Spelke, & Cohen, 2003). The crucial difference between the two positions is that the first assumes an innate ability to represent sets and their abstract properties (including numerosity), while in the second, numerical content is not associated with an ability to represent sets; in fact, the approximate magnitudes are mentally represented in analogue format. Both positions also assume the existence of a Small Number System (SNS) responsible for estimating, at a glance, small sets of quantities (one to three or four), a phenomenon known as subitizing (Mandler & Shebo, 1982).

Furthermore, both positions state that the numerical system, in which the numerical quantities are represented and manipulated mentally, constitutes the cognitive scaffolding on which high-level mathematical competence is built (Feigenson et al., 2004; Jordan, Glutting, & Ramineni, 2010). However, unlike the rest of the species, once language is acquired, humans develop (in an appropriate cultural context) the ability to manipulate non-symbolic quantities through numerical symbols, first using the words for numbers and then digits.

To learn mathematics, developing the non-symbolic numerical system and acquiring numerical symbols is essential. The mastering on manipulation of numerical symbols during the formal teaching process allows children to move to a higher level of mathematical knowledge, where operations with objects are replaced by operations with abstract numerical systems (Butterworth, 1999; Dehaene, 1997; Rubinsten, Henik, Berger, & Shahar-Shalev, 2002).

On the other hand, it is widely recognized that there is a severe and persistent condition of the disorder on learning mathematics, which seems to be caused by a dysfunction in the neural networks responsible for basic numerical processing. This condition is called Developmental Discalculia (DD).

Several authors have suggested that DD emerges from a deficit in the mental representation of numerical quantities per se (Butterworth, 1999, 2005; Dehaene, 1997, 2001). Others suggest that the disorder is caused by a deficit in the access to these representations through numerical symbols (De Smedt & Gilmore, 2011; Iuculano, Tang, Hall, & Butterworth, 2008; Rousselle & Noël, 2007). Up to now, the neurocognitive mechanisms that give rise to this disorder have not yet been fully explained.

The theoretical framework presented here reveals a complex interaction (from top down and from bottom up) between the biological, cognitive and educational levels. Identifying these levels and their interactions constitutes a plausible approach to constructing the necessary bridges between basic research and the implementation of findings into the teaching practices and educational policies.

The Laboratory for Educational Neurosciences from the Cuban Centre for Neurosciences has carried out studies for more than 15 years into this area and has been able to find systematic evidence that supports this theoretical framework. Furthermore, researchers in this laboratory have made efforts to create bridges between the results derived from their experiments and educational practice.

For this review, a selection was made from the findings related to the three levels of the theoretical framework described above (biological, cognitive and educational). Some of these results are unpublished. Additionally, some tools and resources developed by Cuban neuroscientists are described here. They have been created based on the evidence provided by the studies carried out in the laboratory in collaboration with several Cuban educational institutions, and they are now available for teachers and other educational specialists in Cuba.

Neural bases of numerical processing. The case of subitizing

Some theories state that the SNS might be involved in the process of acquiring mathematical knowledge since it provides the notion of exact numbers and facilitates the acquisition of the successor function (Cantlon & Brannon, 2007), while the ANS lacks both properties. This statement is based on evidence that demonstrates that during development the numerals for the numerosities between 1 and 4 are acquired first, and these are then extended to larger sets only after the child has acquired the principles of counting (Wynn, 1992, 1998).

However, there are several approaches that question the contribution of the SNS in mathematical development. According to Piazza (2010), the traces of this system in symbolic numerical processing seem to disappear when the principles of counting are acquired. The author states that until now there have been no behavioural or neuroimaging experiments carried out that show abrupt differences in the processing of symbolic small (1 to 4) and large numerical quantities in comparison, denomination or arithmetic tasks. Conversely, the effects of size and numerical distance in symbolic numerical processing reflect a compressed and approximate scaling which could be interpreted as traces of the ANS. Likewise, there is no evidence from neuroimaging studies in children and adults that shows a discontinuity in activation patterns around the quantities 3 and 4 in the brain regions associated with SNS, such as the posterior parietal region or the right temporo-parietal and occipital cortices. Instead, studies have shown activation in the middle and lower parietal cortex, partially overlapping with the neuronal circuits of the ANS, especially in the left hemisphere, together with progressive hypoactivation of the frontal regions, which seems to reflect the progression in the use of the numerical symbols during development.

In a recent study (Valdés-Sosa, Ontivero, & Reigosa-Crespo, unpublished experiment), 24 typically developed children (n = 24, 11 females, mean age = 8.8, SD = 0.96; average Raven's *CPM* score = 27.2, SD = 5.54) were asked to perform two numerical tasks: dots enumeration and number comparison (both in the range of quantities from 1 to 9). They were also involved in an MRI study for measuring structural brain parameters like cortical thickness.

Individual slopes of reaction time were calculated for the subitizing range (one to three dots) and for the counting range (five to nine dots) from the enumeration task. The individual slopes based on numerical distance were calculated from the symbolic magnitude comparison task.

The aim of the study was to determine whether individual differences in subitizing, counting and comparison of numerical magnitudes were associated with specific changes in cortical morphometry, specifically local cortical thickness. For this, a multiple regression analysis was performed using the value of the cortical thickness parameter in each vertex as dependent variable and the slopes for subitizing, counting and numerical distance as independent variables. The model also included age, sex, digit span score, reading fluency score and the individual average of cortical thickness as covariates. Type I error inflation was controlled by multiple comparisons through the 'false discovery rate' method (FDR, statistical threshold q < .05).

It was found that by controlling the covariates, individual differences in the subitizing slope significantly predicted the differences in cortical thickness of the following regions of the right hemisphere: horizontal segment of the intraparietal sulcus, supramarginal gyrus of the inferior parietal lobe, postcentral gyrus and inferior frontal sulcus. Figure 1 shows the variation in cortical thickness of the horizontal segment of the intraparietal sulcus according to the ability to subitize (measured with the subitizing slope). Fast subitizers exhibited higher cortical thickness values in this region, in which neural networks are especially dedicated to the processing of numerical information. Similar effects related to counting and comparing quantities were not significant when the FDR method was applied.

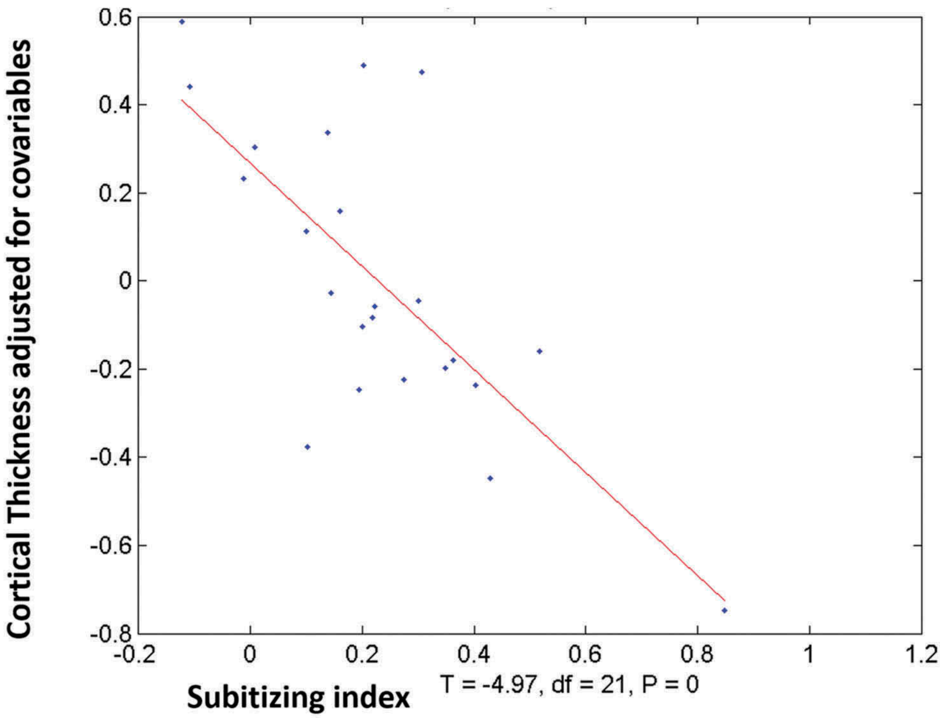

Figure 1. Variation of cortical thickness in the horizontal segment of the intraparietal sulcus as function of the subitizing slope in typical learners.

Note: horizontal segment of the intraparietal sulcus, MNI coordinates: 26.6 − 65.2 30.2

Changes in cortical thickness related to individual differences in the ability to subitize were also observed in regions associated with small quantities processing, but not with numerical processing according to previous reports. However, the association among cortical thickness variations in the horizontal segment of the intraparietal sulcus and the ability to subitize found in this experiment raises question regarding previous theoretical assumptions about the non-numerical nature of the subitizing phenomenon.

The relationship between basic numerical abilities and learning mathematics

In 2013, the researchers of the lab published a short-term longitudinal study with the aim to determine whether the numerical effects related to subitizing, counting and numerical distance were predictors of the mathematical learning measured one year later (Reigosa-Crespo et al., 2013). For this, they tested whether these effects were able to explain additional and unique variance in arithmetic fluency and in a curriculum-based mathematics test after controlling for the effects of general cognitive non-numerical skills. Additionally, they evaluated whether these numerical effects explained the individual variability in a reading fluency task and in a text comprehension task after controlling for the effect of general cognitive abilities and those related to phonological processing.

Third-graders (n = 33, nine females, average age = 9.3, SD = 0.43; mean Raven *CMP* score = 22.5, SD = 5.15 SD = 5.15) and fourth-graders (n = 33, 20 females, mean age = 10.05, SD = 0.48; mean Raven *CMP* score = 23, SD = 5.3) participated in the study. Their reading and mathematics performance were assessed one year later. The results showed that the size of the subitizing effect was a significant predictor of individual variability in arithmetic fluency and in the curriculum-based mathematics test score (Table 1), but not for the variance in reading fluency and comprehension text score (Table 2). The size of the counting effect also predicted the fluency on calculation, although in this case, the association was marginally significant (Table 1).

These findings challenge the statement that basic numerical capacities, especially subitizing, have no association with mathematical learning. This study also confirms that subitizing and counting are domain-specific predictors that not only serve as a starter kit for the acquisition of mathematics but also continue modulating this learning at the end of primary education, and probably beyond. On the other hand, these results have implications for teaching practice because they support the strategy of

Table 1. The association between basic numerical abilities, arithmetic fluency and mathematical knowledge.

		Arithmetic fluency test			Curriculum-based mathematics test		
		β(standard)	ΔR^2	F(change)	β(standard)	ΔR^2	F(change)
	General Predictors						
1	Age	.36	.133	7.050**	−.03	.001	0.066
2	Non-verbal reasoning	.32	.107	6.307*	.68	.459	38.333***
3	Processing speed	−.24	.055	3.429	−.17	.029	2.521
	Total ΔR^2		.295			.489	
	Reading Predictors						
4	Lexical processing	−.13	.017	1.046	−.13	.017	1.458
5	Phonological processing	.32	.029	1.841	−.04	.000	0.040
	Total ΔR^2		.046			.017	
	Numerical Predictors						
	NDE	−.09	.008	0.507	−.12	.013	1.116
	Counting index	.25	.055	3.707†	.01	.000	0.022
	Subitizing index	.29	.071	5.254*	−.33	.095	9.687**
	Total ΔR^2		.134			.108	

Table 2. The association between basic numerical abilities, reading fluency and reading comprehension.

		Reading fluency test			Reading comprehension test		
		β(standard)	ΔR^2	F(change)	β(standard)	ΔR^2	F(change)
1	***General predictors***	.12	.017	0.774	.08	.007	0.303
	Age						
2	Non-verbal reasoning	.51	.263	16.407***	−.27	.075	3.688†
3	Processing speed	−.12	.015	0.941	.02	.001	0.035
	Total ΔR^2		.295			.083	
	Reading Predictors						
4	Lexical processing	−.30	.082	5.661*	−.45	.189	11.136**
5	Phonological processing	.16	.008	0.536	.08	.002	0.118
	Total ΔR^2		.090			.191	
	Numerical Predictors						
	NDE	−.02	.001	0.041	−.11	.012	0.699
	Counting index	−.02	.000	0.032	−.06	.004	0.207
	Subitizing index	−.22	.046	3.146	−.14	.017	0.950
	Total ΔR^2		.047			.026	

'capitalizing', whenever possible, such basic numerical capacities during the formal teaching of mathematics.

Prevalence of developmental dyscalculia. The Havana study

The association between basic numerical capacities (subitizing, enumeration and numerical comparison) and mathematics achievement was analysed using a sample of 11,652 students from the second grade to the ninth grade in a Havana municipality (Reigosa-Crespo et al., 2012). It was found that efficiency in these capacities predicted more than 25% of the individual variability in arithmetic fluency. The score of a curriculum-based mathematics test was also a significant predictor of individual differences in numerical capacities, as was the teachers' opinions about the mathematical achievement of their students.

Based on these findings, basic numerical capacities were used to estimate the prevalence and sex ratio of DD in the general population. The estimated prevalence of DD (deficits in basic numerical capacities and difficulties in mental arithmetic) was 3.4% and the male: female ratio was 4:1. However, the prevalence of arithmetic dysfluency (poor mental arithmetic without deficits on numerical capacities) was three times higher (9.35%) and no differences were found by sex. From these results it was concluded that DD, defined as a specific deficit, could be considered as a distinctive disorder that affects a subset of students who have difficulties with learning mathematics.

This study supports the usefulness of the screening tests based on the numerical capacities for detecting DD, and also supports the value of the strategies that focus on establishing numerical sense as part of specific interventions for students with DD.

The origin of developmental discalculia

According to the model proposed by Feigenson et al. (2004), there are two systems that represent numerical information: the ANS and a verbal system capable of representing numbers exactly. It has been suggested that in the ANS, the number is represented as a fluctuating mental magnitude, similar to a 'number line', shared by the different types of sensory modalities (Dehaene, 1997; Halberda, Mazzocco, & Feigenson, 2008; Izard & Dehaene, 2007).

Once language is acquired, humans develop (in an appropriate cultural context) the ability to represent numbers symbolically by using numerals (the name of numbers) as a first step, and then symbolic numbers (Dehaene & Marques, 2002; Gallistel & Gelman, 2005; Moyer & Landauer, 1967). The development of the symbolic number system allows the individuals access to higher levels of arithmetical competence. It seems that the increasing dominance of this system also influences skills associated with non-symbolic numerical quantities.

Some studies had shown that it is possible to 'calibrate' the numerical mental representations in the mental line from the use of symbolic number information. This evidence supports the existence of an interface between both systems (approximate and verbal). Thus, a decrease in the variability of responses and a significant improvement in the accuracy of the estimates was seen when the subjects were offered certain symbolic information regarding the numbers to be estimated in a non-symbolic estimation task (Izard & Dehaene, 2007; Krueger, 1984; Lipton & Spelke, 2005; Whalen, Gallistel, & Gelman, 1999).

However, how this interface works in DD has not been explored systematically. Notice that several current cognitive hypotheses argue that the origin of DD can be found in a deficit in one of the representational systems described above: in the analogous system — the 'number sense' hypothesis (Dehaene, 1997, 2001); in the verbal system — the 'defective number module' hypothesis (Butterworth, 1999; Butterworth & Reigosa-Crespo, 2007); or in the connection between both systems (Rousselle & Noël, 2007; Wilson & Dehaene, 2007). These hypotheses are based on the assumption that subtle deficiencies in the central core of numerical representation, or in the integration between them, are able to generate a cascade of new deficits in the development of high-level competencies such as addition and multiplication (Karmiloff-Smith, 1998). Based on this, the study of the relationship between the number representation systems in DD could shed light on the causes of the deficiencies in the acquisition of these representations and how it produces deviations in the developmental trajectories of the numerical system (Butterworth, Zorzi, Girelli, & Jonckheere, 2001).

In line with this approach, Castro and Reigosa-Crespo (2011) analysed the interface between approximate and exact numerical processing systems in a group of 30 children (11 females) who showed typical development (TD) in numerical capacities (M = 11.74 years, SD = 0.36), while 24 (seven females) formed the group with DD (M = 11.48 years, SD = 0.33). All children scored between the 50th and 95th percentiles on Raven's Coloured Progressive Matrices (*RCPM*) (Raven, Court, & Raven, 1992).

To evaluate the interface, a non-calibrated estimation task was used in which children had to estimate the numerosity of a set of dots showed during 1,000 msec and a calibrated estimation task where an inductor was included (once for each stimulus block), that is, a set of 30 dots, and simultaneously the number in Arabic notation ('30') that represented the number of items in the set (Figure 2, left). No significant differences were found between both groups in the non-calibrated estimation task. They showed a general tendency to underestimate and the property of scalar variability in their estimates was observed. This result supports an intact representation of numerical quantities in typical children and children with DD. However, in the calibrated condition, children with TD adjusted their responses better to the real

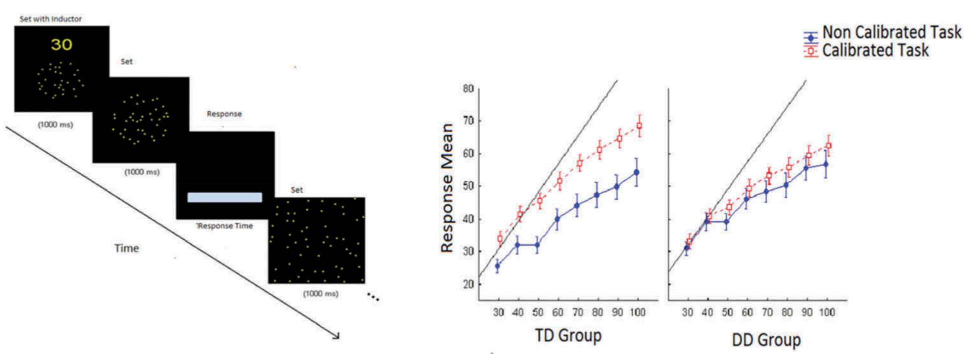

Figure 2. Overall effect of calibration during a numerical estimation task in children with typical development and children with developmental dyscalculia.

number of the set, while children with DD did not (Figure 2, right). Likewise, the Weber Fraction value improved significantly in the calibrated task with regard to the non-calibrated task in children with TD (.25 and .29, respectively; $p < .05$), but not in children with DD (.27 and .29, respectively; p: not significant). These results support the hypothesis that the cause of DD is related to a deficit in the interface between the analogue and verbal systems.

Tools for approaching the development of numerical cognition in the classroom

Teachers are natural developers of the neurocognition. They systematically modify their students' brains while accompanying them in learning reading, mathematics and reasoning skills (Butterworth, Varma, & Laurillard, 2011). For this reason, the classroom emerges like an appropriate context for interventions that contribute to enhancing learning based on the findings of cognitive neurosciences.

Why implement school-based programmes based on this approach?

Reason 1. Evidence from neuroscience research

Nowadays, there is robust evidence about the existence of specific brain networks responsible for the basic capacities which are closely related to the learning of mathematics. These neurocognitive capacities may function as part of a 'starter kit' for understanding numbers, and their influence on maths achievement continues beyond the first grades of elementary education. If these skills fail to develop in a typical manner, deleterious effects on the acquisition of higher-level reading and maths competences may consequently occur (Butterworth et al., 2011).

Reason 2. Economic impact

The association between cognitive skills and economic growth:

Average years of schooling are a particularly incomplete measure of education for comparing the impact of human capital on the economies of different countries. This measure implicitly assumes that a year of schooling delivers the same increase in knowledge and skills regardless of the education system. Analysis instead must rely upon cognitive skills measured during the schooling period.

An extended empirical analysis related long-term growth to cognitive skills and other aspects of national economies based on an international dataset for 50 countries (OECD, 2010). In this report, regional growth in real per capita GDP between 1960 and 2000 against average test scores after allowing for differences in initial GDP per capita in 1960 was analysed. The results suggest that, conditional on initial income levels, regional growth over the last four decades is completely described by differences in cognitive skills. Moreover, once information is included on cognitive skills, school attainment bears no relation to economic growth. In other words, added years of schooling do not affect growth unless they yield greater achievement

Reason 3. Life outcome impact

It has been widely accepted that difficulties in educational achievement can have deleterious impact on the life outcomes of children. Learning difficulties are the consequence of multiple factors including pedagogical, environmental, sociocultural, health and so on. Atypical neurocognitive development — in association or not with other factors previously mentioned — probably increases the risk of a negative life impact because it is a persistent condition over time and also because it is resistant to traditional pedagogical interventions.

To test this hypothesis, Reigosa-Crespo, Torres, Estévez, Álvarez, Recio, Mosquera, Amor and Valdés-Sosa (unpublished work) conducted a 10-year follow-up study (2003–13) of individuals with learning difficulties associated with an atypical neurocognitive development (LD/AND, n = 19, nine females, average age ($t2$) = 20.3, SD = 2.08) and other individuals with learning difficulties but typical neurocognitive development (LD/TND, n = 78, 34 females, average age ($t2$) = 20.06, SD = 2.78). As reference, they recruited a group of typical learners (n = 76, 33 females, average age ($t2$) = 18.9, SD = 2.95). They found that the LD/AND group had more relative risk of dropping out of education, addictive behaviours, early paternity, abortions and unemployment compared with the typical learners than the LD/TND group (Table 3). These results support the initial hypothesis and highlight the urgency of early identification and the intervention of deviations of numerical neurocognitive development during school age.

A proposal

An intervention strategy focused on neurocognitive development requires sustainable tools and designs that adhere to global and local contexts. Researchers at the Laboratory for Educational Neurosciences from the Cuban Centre for Neurosciences have developed the tools necessary to make this type of strategy possible (Santos-Febles et al., 2015). These tools are teachers' questionnaires for identification of early signs of atypical neurocognitive development, and also tests for profiling the individual's neurocognitive status. This profile may facilitate interventions focusing on individual differences in the classroom.

A plan that uses these tools must have five fundamental characteristics:

Table 3. Relative risk of negative results in the transition to adulthood in individuals with developmental dyscalculia or with difficulties in learning mathematics.

	Developmental Dyscalculia		Mathematical learning difficulties	
	RR	*CI* (95%)	*RR*	*CI* (95%)
Post-secondary school studies	2.94	0.93–9.2927*	1.36	0.49–3.75 (*ns*)
Special education	7.68	0.63–80.71 (*ns*)	9.25	1.20–71.16**
Poor concentration in classes	1.47	1.15–1.86**	1.02	0.78 1.31 (*ns*)
Problems at home	2.94	0.93–9.2927*	1.36	0.49–3.75 (*ns*)
Unemployed	5.33	1.30–21.84**	2.63	0.72–9.54 (*ns*)

Note: *RR*: relative risk; *CI*: confidence intervals
**p < .001, *p < .05, *ns*: not significant

A 'closed cycle' approach: alerts, neurocognitive profiling, intervention and monitoring

A 'closed cycle' approach means that the plan implies: (i) the identification of early signs of atypical neurocognitive development in the learners; (ii) profiling of individual differences relative to strengths and weaknesses in neurocognitive capacities; (iii) personalized intervention in the classroom based on neurocognitive profiles; and (iv) monitoring the students' progress by re-use of the tools for detection and profiling.

Take advantage of ICT

As is known, UNESCO and IBE promote the integration of ICT into curricula, teaching, learning and assessment as a main goal for education until 2030 (UNESCO-IBE, 2016). In line with this endeavour, this plan takes advantage of current ICT availability. Tools for detecting 'red flags' are based on mobile solutions, whereas tools for profiling neurocognitive development are computerized tests that facilitate precision and accuracy in the assessment. Both have been developed as client-server applications (Santos-Febles et al., 2015). The teacher training in educational neuroscience is designed in an e-learning environment. The intervention includes strategies for attending to individual differences in the classroom and also evidence-based digital intervention.

Teaching the teachers

The purpose of this strategy is to drive teacher training in two ways. Firstly, teachers are educated about the neurobiology of learning, the neurocognitive development of students and their relationship with mathematical learning and also about how this knowledge can influence their teaching practice. Secondly, educators are given the skills needed to use ICT as part of the educational process.

Identifying alerts in neurocognitive development can be a powerful way to produce timely and well-targeted interventions. However, educators must understand the relationships between the brain, cognition and learning in order to properly manage individual differences in neurocognitive development in educational settings. The most effective strategies might be those in which individual differences are considered opportunities rather than problems that must be addressed. On this basis, differences can provide the teacher with opportunities to experiment with strategies that involve everyone in meaningful activities — for example, cooperative learning.

An 'ecological' approach

The plan could be designed to run in schools and to avoid clinical practices which are mainly focused on diagnosis and treatment of disorders. Indiscriminate use of these practices can lead to stigmatization and segregation of those with special needs. Under this plan, teachers who receive training in neuroscience and ICT can use the screening tools in mobile devices like smartphones or tablets for identifying neurocognitive 'red flags' in their students. Based on these early signs and also on the information resulting from individual neurocognitive profiles, teachers can elaborate multiple strategies for attending to individual differences in the classroom. This approach supports an 'ecological' perspective since it benefits from the natural conditions of the school environment and everyday teaching-learning interactions. At the same time, these educational practices may be positively impacted as a consequence of this plan.

Implementing the proposal

The Ecuadorian Ministry of Education, in collaboration with the Laboratory for Educational Neuroscience of Cuban Centre for Neurosciences, conducted a pilot study with 20,030 students from the second grade to the sixth grade and 1,598 teachers and other educational specialists.

This study was conducted between 2014 and 2015. During this period, the teacher training programme and the detection of alert signs in students' neurocognitive development were analysed. Figure 3 shows the study stages (A), the tools used at each stage (B), the courses for teachers (C) and the relationship found between the alerts identified by the teachers and the neurocognitive profiles of the children (D). Notice that the greater the number of alerts detected by the teacher, the more atypical the neurocognitive profile. This association was statistically significant.

On the other hand, an anonymous satisfaction survey was carried out by 287 participating teachers at the end of stages 1 and 2. This survey contained statements such as: 'I had knowledge on the subjects taught', 'The tutors' explanations were clear', 'We analysed real issues in the classroom', 'The training was useful for my classroom practices', 'The training had an effect on changing my pedagogical style: how I see my students and therefore how I teach them'. A five-point Likert scale was used ('not at all'/

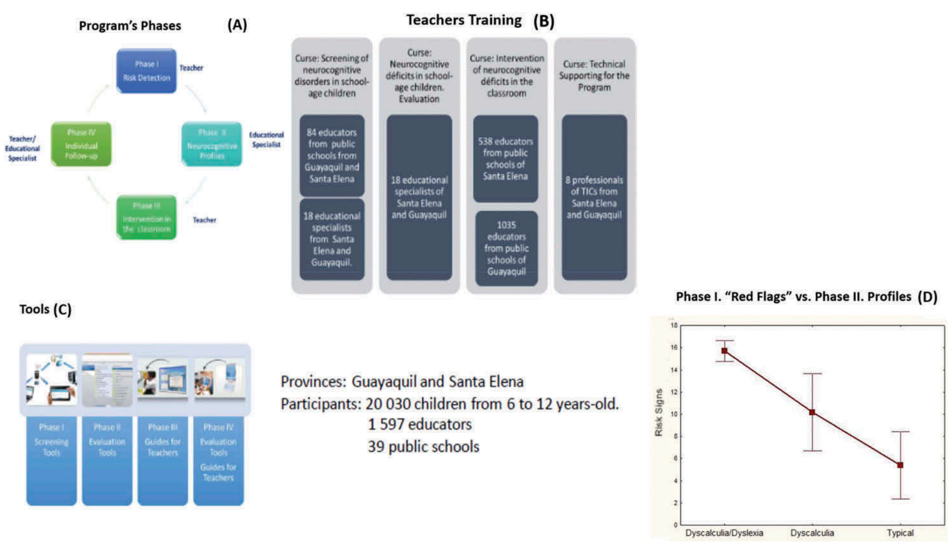

Figure 3. Implementation of an intervention strategy focused on neurocognitive development in the classroom.

'a little'/'somewhat'/'quite a bit'/'a lot'). The average of the scores in all the statements ranged from 2 to 3.2; the average was 2.9.

The main difficulties that emerged during the implementation of the program included high dependence on trainers and experts, poor connectivity at schools, insufficient support from the regional education authorities and poor support from parents.

Challenges for educational policies and practices

The translation barriers

There is a lack of an integrated knowledge base that limits the effectiveness of disseminating findings from the laboratory into the classroom. A common platform and a common language become necessary for helping to identify and to address misunderstandings as they arise, and to develop concepts and messages that are both scientifically valid and educationally informative (Howard-Jones et al., 2016). A critical component of this endeavour is that tangible financial resources must materialize for progress to be made, from the local level all the way up to the governments. Notice that, as a worldwide practice, the government education budget spent on research is significantly smaller compared, for example, with the government health budget spent on research.

The teaching profession

The majority of in-service teachers have no knowledge about science of learning in their backgrounds and pre-service teachers do not receive information about that. Removing the barriers to translation is a necessary condition for effectively teaching teachers about the brain, cognition and learning. In line with this, a thoughtful way for training teachers is to create courses in partnership between teachers and researchers on science of learning (Pickering & Howard-Jones, 2007).

On the other hand, introducing the neurobiology of learning as part of the initial teacher education requires faculty cooperation across department and college lines (Dubinsky, Roehrig, & Varma, 2013). In this sense, effective mechanisms should be established in order to diminish administrative barriers relating to the development of tuition-sharing arrangements, calculating faculty time assignments, etc. and, also, for coordinating the participation of the faculties which have different sets of pressures and priorities. At the level of individual faculty, communication and cooperation among people with expertise in each area should be required. For example, concepts such as synapsis, neural plasticity, sensitive periods, memory recovery and cognitive process must be explained by researchers to educators, and concepts such as curriculum, assessment and learning trajectories must be explained by educators to researchers. A final challenge for introducing science of learning content into initial teacher education is that university-level teacher educators need to be convinced that doing so will result in preparing better classroom teachers. Finally, policy-makers need to bear in mind that when introducing science of learning concepts as a background for initial teacher education, new entry requirements and new qualifications for future teachers must be considered.

Conclusions

The cognitive neurosciences have provided us with evidence that could be 'usable knowledge' for the educational practice. Specifically, the establishment of a theoretical model that links the biological, cognitive and educational levels ensures an emphasis on the numerical neurocognitive capacities that act as an interface between brain functioning and the learning of mathematics. This bridge is possible because of the main features of the basic numerical capacities: they have tangible neural bases and they emerge very early during the development; they maintain a bidirectional link with learning in formal and non-formal contexts. This link occurs throughout life, not only in early childhood; they are specifically related to the acquisition of mathematical knowledge and not related to others; they are responsible for specific disorders in mathematical learning; they can be modified through intervention; and they show relative independence of each other, which facilitates their evaluation and also carrying out highly specific interventions. This paper has provided evidence that supports several of the features mentioned above.

Teachers and neuroscientists can develop interventions together which can contribute to enhancing the learning of mathematics. A strategy based on this approach could contribute to narrowing the gap between the conclusions derived from experiments in the laboratory and educational policies and practices. This statement is based on the key feature of the strategy presented in this paper: the classroom as the best context and the teacher as the best actor to carry out the plan. The implementation of such strategies in the classroom would be a step that contributes to achieving a more equitable and quality education for life.

Habilidades numéricas y discalculia. De la investigación básica a la práctica en Cuba

El sistema numérico. La interacción entre los niveles biológico, cognitivo y educacional

Según teorías actuales sobre el desarrollo cognitivo típico, la adquisición del conocimiento está basada en un conjunto restringido de sistemas nucleares definidos por representaciones primarias de dominio específico que rigen y constriñen la adquisición cultural de nuevas representaciones de más alto nivel. Kinzler y Spelke (2007) definen el Sistema Numérico como uno de estos sistemas nucleares, siendo este responsable del procesamiento básico de las cantidades numéricas.

Algunos estudios muestran evidencia del carácter innato de este sistema (Hart, Petrill, & Thompson, 2010; Kovacs et al., 2007). Su funcionamiento puede ser observado en niños pre-verbales (Gelman & Meck, 1983; Lipton & Spelke, 2003; Wynn, 1992; Xu & Spelke, 2000), e incluso, en animales (Nieder, 2005; Nieder & Miller, 2004), así como en poblaciones provenientes de culturas 'libres del número' (Butterworth, Reeve, Reynol, & Lloyd, 2008; Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004). Por otra parte, evidencias provenientes de estudios de neuroimágenes muestran que los procesos que subyacen a la representación y manejo de las nume-rosidades tienen correlatos neurales circunscritos al lóbulo parietal inferior y superior, y más específicamente, al segmento horizontal del surco intrapa-rietal de ambos hemisferios cerebrales (ver meta-análisis de Arsalidou & Taylor, 2010).

Existen dos concepciones diferentes acerca de las bases innatas de este sistema numérico. Por una parte, se plantea que los niños pequeños poseen un '*módulo numérico*' que les permite construir conceptos sobre la numerosidad exacta de los conjuntos (Butterworth, 1999; Gelman & Gallistel, 1978). Por otra parte, se ha propuesto que los niños pequeños están equipados por un 'sentido' para las numerosidades aproximadas o *Sistema numérico aproximado* (SNA), (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004) sobre el cual se construyen los conceptos de numerosidades exactas con la ayuda del lenguaje (Lemer, Dehaene, Spelke, & Cohen, 2003). La diferencia crucial entre ambas posiciones es que la primera asume una capacidad innata para representar los conjuntos y sus propiedades abstractas (incluyendo la numerosidad) mientras que, en la segunda, el contenido numérico no está relacionado con la capacidad para representarse los conjuntos; de hecho, las magnitudes aproximadas son mentalmente representadas en formato analógico. Ambas posturas asumen además, la existencia de un *Sistema de cantidades pequeñas* (SCP) responsable de la estimación a golpe de vista de pequeños conjuntos (de uno a tres o cuatro elementos), fenómeno éste conocido como subitización (Mandler & Shebo, 1982).

Por otra parte, las dos posiciones comparten la idea de que este sistema numérico, en el cual se representan y manipulan mentalmente las cantidades numéricas, constituye el andamiaje cognitivo sobre el cual se construye la competencia matemática de alto nivel (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Jordan, Glutting, & Ramineni, 2010). Sin embargo, a diferencia del resto de las especies, una vez que el lenguaje es adquirido, los humanos desarrollan (en un contexto cultural apropiado), la habilidad de manipular las cantidades no-simbólicas a través de símbolos numéricos, primero usando las palabras que denominan a los números y luego dígitos.

Para el aprendizaje de las matemáticas es importante el desarrollo del sistema numérico no-simbólico y la adquisición de los símbolos numéricos. El perfeccionamiento en la manipulación de los símbolos numéricos durante el proceso de su enseñanza formal, le permite al niño el paso a un nivel superior, donde se sustituyen las operaciones con objetos por operaciones con sistemas numéricos abstractos (Butterworth, 1999; Dehaene, 1997; Rubinsten, Henik, Berger, & Shahar-Shalev, 2002).

Por otra parte, cada vez más se reconoce que existe una condición grave y persistente del trastorno en el cálculo, que parece deberse a una disfunción en las redes neuronales encargadas del procesamiento numérico básico. A esta condición se le denomina Discalculia del Desarrollo (DD).

Varios autores proponen que la DD emerge a partir de un déficit en la representación mental de las cantidades numéricas per se (Butterworth, 1999, 2005; Dehaene, 1997, 2001). Otros, por el contrario, plantean que este trastorno es causado por un déficit en el acceso a estas representaciones a través del símbolo numérico (De Smedt & Gilmore, 2011; Iuculano, Tang, Hall, & Butterworth, 2008; Rousselle & Noël, 2007). Hasta hoy no están completamente dilucidados los mecanismos neurocognitivos que dan lugar a este trastorno.

El marco teórico aquí presentado revela una interacción compleja (de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba) de los niveles biológico, cognitivo y educacional. Reconocer estos niveles y sus interacciones constituye un avance y buen punto de partida para el establecimiento de los puentes necesarios entre la investigación básica y la implementación de resultados en las prácticas docentes y políticas educativas.

El laboratorio de Neurociencias Educacionales del Centro de Neurociencias de Cuba ha realizado estudios, durante más de 15 años, que le han permitido obtener un cuerpo sólido de evidencias que da sustento a este marco teórico. Por otra parte, los investigadores de este laboratorio han realizado esfuerzos en el establecimiento de puentes entre los resultados derivados de sus experimentos y la práctica educativa.

Para esta revisión se realizó una selección considerando resultados relacionados con los tres niveles del marco teórico antes descrito (biológico, cognitivo y educacional). Algunos de estos resultados están publicados y otros no. Asimismo, se presentan herramientas desarrolladas por los neurocientíficos cubanos para su uso por los maestros y especialistas afines a la educación las cuales están basadas fundamentalmente, en las evidencias aportadas por los estudios realizados en dicho laboratorio de conjunto con las instituciones educativas cubanas.

Bases neuronales del procesamiento numérico. El caso de la subitización

Algunas teorías proponen que el SCP podría estar involucrado en la adquisición del conocimiento matemático dado que provee la noción del número exacto y posibilita la adquisición de la función de sucesor (Cantlon & Brannon, 2007) mientras que el SNA carece de ambas propiedades. Esta afirmación se sustenta en evidencias que demuestran que, durante el desarrollo, se adquieren primeramente los numerales para las numerosidades entre 1 y 4, y estos se extienden a los conjuntos más grandes solo después que el niño ha adquirido los principios del conteo (Wynn, 1992, 1998).

No obstante, existen ciertos elementos que ponen en duda la contribución del SCP al desarrollo matemático posterior. Según Piazza (2010) las trazas de este sistema en el procesamiento numérico simbólico parecen desaparecer cuando los principios del conteo son adquiridos. La autora afirma que, hasta el momento, no hay reportes de experimentos conductuales o de neuroimágenes que muestren diferencias abruptas en el procesamiento de números simbólicos pequeños (1 a 4) y grandes en tareas de comparación, denominación o aritmética. Por el contrario, los efectos de magnitud y distancia numérica en el procesamiento numérico simbólico reflejan un escalamiento comprimido y aproximado lo cual pudiera ser interpretado como trazas del SNA. Asimismo, no existe evidencia proveniente de los estudios de neuroimágenes en niños y adultos que muestren una discontinuidad en los patrones de activación alrededor de las cantidades ‘3’ y ‘4’ en regiones cerebrales tentativamente asociadas al SCP como son la región parietal posterior, así como las cortezas temporo-parietal derecha y occipital. En su lugar se ha observado activación en la corteza parietal media e inferior parcialmente solapada con los circuitos neuronales del SNA, especialmente del hemisferio izquierdo, de conjunto con una hipoactivación progresiva de las regiones frontales lo que parece apoyar la progresión en el uso de los símbolos numéricos durante el desarrollo.

En un estudio reciente (Valdés-Sosa, Ontivero, & Reigosa-Crespo, trabajo no publicado) se les pidió a 24 niños con desarrollo típico entre ocho y nueve años de edad (n = 24, 11 niñas, media de edad = 8.8, *DE* = 0.96; media Raven *CPM* (puntaje bruto) = 27.2, *DE* = 5.54) que realizaran tareas de enumeración de puntos y de comparación de magnitudes, ambas en el rango de numerosidades de 1 a 9. Se les realizó, además, un estudio de RMN estructural y se midió el parámetro de grosor cortical.

Se calcularon las pendientes individuales de tiempo de reacción para el rango de subitización (1 a 3 puntos) y para el rango de conteo (5 a 9 puntos) en la tarea de enumeración de puntos. También se calcularon las pendientes individuales de tiempo de reacción según la distancia numérica en la tarea de comparación no simbólica de magnitudes.

El objetivo del estudio fue determinar si las diferencias individuales en las capacidades básicas de subitización, conteo y comparación de magnitudes numéricas estaban asociadas a cambios específicos en la morfometría cortical, especialmente en el grosor cortical local. Para ello se realizó un análisis de regresión múltiple del valor del parámetro de grosor cortical en cada vertex con los valores de pendientes de subitización, conteo y distancia numérica como variables independientes, El modelo incluyó como covariables de no interés, la edad, el sexo, la media del grosor cortical individual, el puntaje en la tarea de span de dígitos y la fluidez en lectura. Se controló la inflación del error tipo I por múltiples comparaciones a través del método 'false discovery rate' (FDR, umbral estadístico $q < .05$).

Se encontró que, controlando las variables de no interés, las diferencias individuales en la subitización predijeron significativamente las diferencias en el grosor cortical de las siguientes regiones del hemisferio derecho: segmento horizontal del surco intraparietal, giro supramarginal del lóbulo parietal inferior, giro postcentral y surco frontal inferior. La Figura 1 muestra la variación en el grosor cortical del segmento horizontal del surco intraparietal en función de la habilidad para subitizar (medida a través de la pendiente de subitización). Los niños buenos subitizadores exhibieron valores más altos de grosor cortical en esta región, en la cual se encuentran redes neuronales especialmente dedicadas al procesamiento de información numérica. Efectos similares relacionados con el conteo y el procesamiento de magnitudes no resultaron significativos cuando se aplicó el umbral estadístico definido para el FDR.

Los cambios en el grosor cortical relacionados con las diferencias individuales en la habilidad para subitizar se observaron en regiones previamente identificadas con el procesamiento de cantidades pequeñas no asociadas al procesamiento propiamente numérico. Sin embargo, el hecho de encontrar en este estudio variaciones de grosor

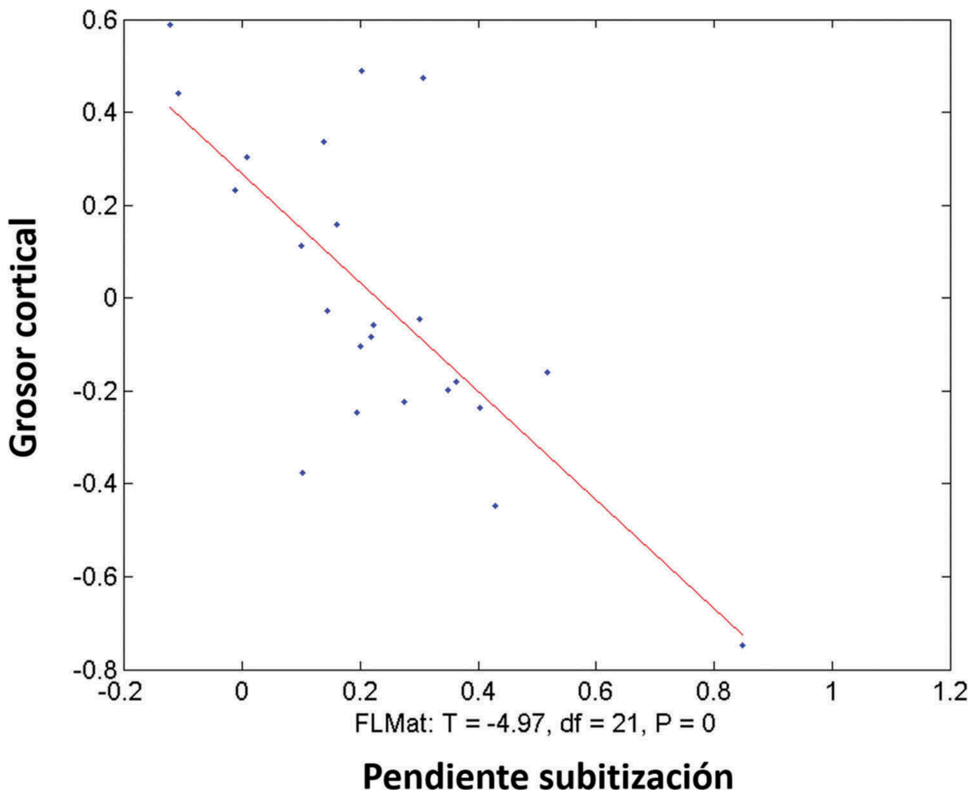

Figura 1. Grosor cortical del segmento horizontal del surco intraparietal en función de la pendiente de subitización.

Nota: segmento horizontal del surco intraparietal, coordenadas MNI: 26.6 − 65.2 30.2

cortical en el segmento horizontal del surco intraparietal asociadas a la habilidad para subitizar, reta los supuestos teóricos previos acerca del carácter no numérico de la subitización.

La relación entre las capacidades numéricas básicas y el aprendizaje de las matemáticas

En 2013, los investigadores del laboratorio realizaron un estudio longitudinal para determinar si los efectos numéricos de subitización, conteo y distancia numérica era predictores de dominio específico del aprendizaje matemático medido un año después (Reigosa-Crespo et al., 2013). Para ello, se testeó si estos efectos eran capaces de explicar varianza adicional y única en la fluidez aritmética y en una prueba de matemáticas basada en el currículo después de controlar los efectos de habilidades cognitivas generales no numéricas. Adicionalmente se evaluó si estos efectos numéricos explicaban la variabilidad individual en la fluidez lectora y en un test de comprensión después de controlar el efecto de habilidades cognitivas generales y de aquellas relacionadas con el procesamiento fonológico.

En el estudio participaron niños de 3er grado (n = 16, nueve niñas, media edad = 9.3, *DE* = 0.43; media Raven *CMP* = 22.5, *DE* = 5.15) y de 4to grado (n = 33, 20 niñas, media edad = 10.05, *DE* = 0.48; media Raven *CMP* = 23, *DE* = 5.3). El desempeño en lectura y matemática fue evaluado un año después. Los resultados muestran que el tamaño del efecto de subitización fue un predictor significativo de variabilidad individual en la fluidez aritmética y en el puntaje en el test de matemática basado en el currículo (Tabla 1), no así de la varianza en la fluidez lectora y la compresión (Tabla 2). El tamaño del efecto del conteo también predijo la fluidez en el cálculo aunque en este caso la asociación resultó ser marginalmente significativa (Tabla 1).

Estos hallazgos contrastan con los supuestos acerca de que las capacidades básicas medidas a través de tareas de enumeración, en especial la subitización, mantienen una asociación débil con el desempeño matemático. Este estudio permitió afirmar que dichas capacidades constituyen predictores de dominio específico y además, no son

Tabla 1. La asociación entre las capacidades numéricas básicas, la fluidez aritmética y el puntaje en una prueba de matemática basada en el currículo.

		Fluidez Aritmética			Prueba de matemáticas basada en currículum		
		β(standard)	ΔR^2	*F*(change)	β(standard)	ΔR^2	*F*(change)
	Predictores generales						
1	Edad	.36	.133	7.050**	–.03	.001	0.066
2	Razonamiento no verbal	.32	.107	6.307*	.68	.459	38.333***
3	Velocidad de procesamiento	–.24	.055	3.429	–.17	.029	2.521
	Total ΔR^2		.295			.489	
	Predictores de Lectura						
4	Procesamiento Lexical	–.13	.017	1.046	–.13	.017	1.458
5	Procesamiento Fonológico	.32	.029	1.841	–.04	.000	0.040
	Total ΔR^2		.046			.017	
	Predictores Numéricos						
	EDN	–.09	.008	0.507	–.12	.013	1.116
	Indice de Conteo	.25	.055	3.707†	.01	.000	0.022
	Indice de Subitización	.29	.071	5.254*	–.33	.095	9.687**
	Total ΔR^2		.134			.108	

Tabla 2. La asociación entre las capacidades numéricas básicas, la fluidez lectora y el puntaje en una prueba de comprensión lectora.

		Fluidez Lectora			Comprensión Lectora		
		β(standard)	ΔR^2	F(change)	β(standard)	ΔR^2	F(change)
1	***Predictores generales***	.12	.017	0.774	.08	.007	0.303
	Edad						
2	Razonamiento no verbal	.51	.263	16.407***	−.27	.075	3.688†
3	Velocidad de procesamiento	−.12	.015	0.941	.02	.001	0.035
	Total ΔR^2		.295			.083	
	Predictores de Lectura						
4	Procesamiento Lexical	−.30	.082	5.661*	−.45	.189	11.136**
5	Procesamiento Fonológico	.16	.008	0.536	.08	.002	0.118
	Total ΔR^2		.090			.191	
	Predictores Numéricos						
	EDN	−.02	.001	0.041	−.11	.012	0.699
	Indice de Conteo	−.02	.000	0.032	−.06	.004	0.207
	Indice de Subitización	−.22	.046	3.146	−.14	.017	0.950
	Total ΔR^2		.047			.026	

solo un kit de arranque para la adquisición de las matemáticas sino que ellas continúa modulando este aprendizaje al final de la educación primaria, y probablemente más allá. Estos resultados también tienen implicaciones importantes para la práctica docente pues apoyan la idea de 'capitalizar' siempre que se pueda, dichas capacidades durante la enseñanza formal de las matemáticas.

Prevalencia de la discalculia del desarrollo. El estudio de La Habana

La asociación entre las capacidades numéricas básicas (subitización, enumeración y comparación de magnitudes) y el desempeño en matemáticas fue examinada en una muestra de 11,652 estudiantes de 2do a 9no grado de un municipio de La Habana (Reigosa-Crespo et al., 2012). Se encontró que la eficiencia en esas capacidades predijo más del 25% de la va-riabilidad individual en la fluidez aritmética. También resultaron predictores significativos de las diferencias individuales en los resultados de un test de matemática basado en el currículo así como del puntaje otorgado por el maestro respecto a la habilidad matemática observada en sus estudiantes.

Basados en estos hallazgos, las capacidades numéricas básicas fueron utilizadas para estimar la prevalencia y la proporción por sexo de la DD en la población general. La prevalencia estimada de DD (déficits en las CNB y dificultades en la aritmética mental) fue de 3.4% y la proporción varón:niña fue 4:1. Sin embargo, la prevalencia de disfluencia aritmética (pobre aritmética mental sin déficits en las CNB) fue tres veces mayor (9.35%) y no se encontraron diferencias por sexo. A partir de estos resultados se concluyó que la DD, definida como un déficit específico en capacidades neurocognitivas numéricas, pudiera ser considerada un trastorno distintivo que afecta solo a una parte de los estudiantes con dificultades en el aprendizaje de las matemáticas.

Estos resultados apoyan el uso de pruebas de tamizaje de la DD basadas dichas capacidades. También enfatizan la importancia del uso de estrategias focalizadas en sedimentar el sentido numérico como estrategia fundamental de intervención de los estudiantes que padecen DD.

El origen de la discalculia del desarrollo

De acuerdo al modelo propuesto por Feigenson, Dehaene, y Spelke (2004), existen dos sistemas para representar la información numérica: el SNA análogo a una línea numérica mental y un sistema verbal capaz de representar los números exactamente. Se ha planteado que en el SNA se representa la numerosidad como una magnitud mental fluctuante, similar a una 'línea numérica', la cual es compartida por los diferentes tipos de modalidades sensoriales (Dehaene, 1997; Halberda, Mazzocco, & Feigenson, 2008; Izard & Dehaene, 2007).

Una vez que el lenguaje es adquirido, los humanos desarrollan (en un contexto cultural apropiado), la habilidad de representar numerosidades de forma simbólica, primero usando numerales y luego los dígitos arábigos (Dehaene & Marques, 2002; Gallistel & Gelman, 2005; Moyer & Landauer, 1967), lo cual les permite el acceso a un nuevo nivel de competencia para la aritmética exacta. Al parecer, el dominio creciente de un sistema numérico simbólico influye en el perfeccionamiento de las destrezas adquiridas anteriormente para el manejo de las cantidades numéricas no simbólicas.

Algunos estudios muestran evidencias de que es posible 'calibrar' las representaciones mentales numéricas en la línea mental a partir del uso de la información simbólica del número, lo cual apoya la existencia de una interfaz entre ambos sistemas (aproximado y verbal). Así, se ha observado una disminución de la variabilidad en las respuestas y una mejoría significativa de la precisión de las estimaciones cuando se ofrece a los sujetos alguna información simbólica acerca de las numerosidades que debe estimar en una tarea de estimación no simbólica, (Izard & Dehaene, 2007; Krueger, 1984; Lipton & Spelke, 2005; Whalen, Gallistel, & Gelman, 1999).

Sin embargo, el comportamiento de esta interfaz en la DD ha sido poco abordado. Varias teorías cognitivas actuales sostienen que el origen de la DD está en un déficit en uno de los sistemas representacionales descritos anteriormente: en el sistema análogico — hipótesis del 'sentido del número' (Dehaene, 1997, 2001) — o en el sistema verbal — hipótesis del 'módulo numérico defectuoso' (Butterworth, 1999; Butterworth & Reigosa-Crespo, 2007); o en la conexión entre ambos sistemas (Rousselle & Noël, 2007; Wilson & Dehaene, 2007). Estas teorías parten del supuesto de que sutiles deficiencias en los núcleos centrales de representación numérica, o en la integración entre estos, pueden generar una cascada de nuevos déficits en el desarrollo de competencias de alto-nivel como la adición y la multiplicación (Karmiloff-Smith, 1998). A partir de esta idea, el estudio de la interrelación entre los sistemas representacionales en la DD, permitiría explicar las deficiencias en las representaciones numéricas básicas y cómo estas generan el desarrollo de un sistema numérico desviado (Butterworth, Zorzi, Girelli, & Jonckheere, 2001)

En línea con esta idea, Castro and Reigosa-Crespo (2011) evaluaron la interfaz entre los sistemas aproximado y exacto de procesamiento numérico en un grupo de 30 niños (de ellos, 11 niñas) con desarrollo típico (DT) de las habilidades numéricas: (M = 11.74 años, DE = 0.36), mientras que 24 niños (de ellos, siete niñas) formaron el grupo con DD (M = 11.48 años, DE = 0.33). Los niños pertenecientes a ambos grupos obtuvieron

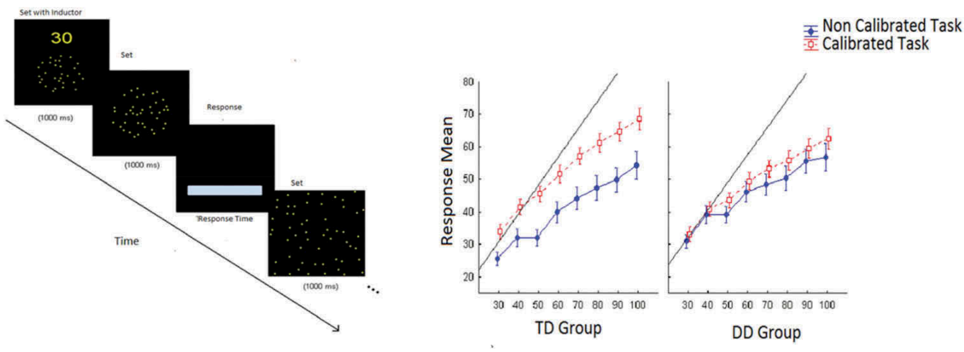

Figura 2. Efecto global de la calibración en niños con desarrollo típico y niños con discalculia del desarrollo.

puntajes entre el 50 y el 95 percentil en el Test de Matrices Progresivas Coloreadas (TMPC) (Raven, Court, & Court, 1992).

Para evaluar la interfaz se utilizó una tarea de estimación no calibrada en la cual los niños debían estimar la cantidad de un conjunto de puntos mostrado durante un intervalo de 1,000 mseg y una tarea de estimación calibrada donde se presentaba sistemáticamente un inductor (una vez por cada bloque de estímulos), es decir, un conjunto y simultáneamente el número en notación arábiga ('30') que representaba la cantidad de elementos del conjunto (Figura 2, izquierda). No se encontraron diferencias significativas entre los grupos en la ejecución de la tarea de estimación no calibrada. Ambos mostraron una tendencia general a la subestimación así como la propiedad de la variabilidad escalar en sus estimaciones lo cual fundamenta la existencia de representaciones mentales de cantidades numéricas intactas. Sin embargo, en la tarea de estimación calibrada los niños con desarrollo típico ajustaban mejor sus respuestas a la numerosidad real del conjunto mientras que los niños con DD no lo hacían (Figura 2, derecha). Asimismo, el valor de la Fracción de Weber, mejoró significativamente en la tarea calibrada respecto a la no calibrada en los niños con DT (.25 y .29, respectivamente; $p < .05$), pero no en los niños con DD (.27 y .29, respectivamente; p: no significativa). Estos resultados, sustentan la hipótesis de que los niños con desarrollo típico y atípico de las habilidades numéricas, siguen los mismos principios y regularidades observados en el adulto y que existe un déficit en la interfaz entre los sistemas analógico y verbal en los niños con DD.

Herramientas para abordar el desarrollo neurocognitivo desde la clase

Los maestros son modeladores neurocognitivos. Ellos modifican el cerebro de sus estudiantes sistemáticamente mientras los acompañan en el aprendizaje de la lecto-escritura, la aritmética y las habilidades de razonamiento (Butterworth et al., 2011). Por esta razón, la clase pudiera convertirse en un escenario adecuado para realizar intervenciones que contribuyan a potenciar el aprendizaje basadas en los hallazgos de las neurociencias cognitivas.

¿Por qué implementar programas basados en la escuela con este enfoque?

Razón 1. Las evidencias que aportan las neurociencias

Hoy día, hay pruebas sólidas sobre la existencia de redes cerebrales específicas responsables de capacidades básicas que están estrechamente relacionadas con el aprendizaje de las matemáticas. Estas capacidades numéricas básicas pueden funcionar como parte de un 'kit inicial' para entender las cantidades numéricas y su influencia en los logros de aprendizaje de las matemáticas continúa más allá de los primeros grados de la educación primaria. Si estas habilidades no se desarrollan de una manera típica, en consecuencia, pueden producir efectos deletéreos en la adquisición de competencias matemáticas de nivel superior (Butterworth et al., 2011).

Razón 2. Impacto económico

La asociación entre habilidades cognitivas y crecimiento económico:

El promedio de años de escolaridad es una medida de educación particularmente incompleta para comparar los impactos del capital humano en las economías de los diferentes países. Supone implícitamente que un año de escolaridad ofrece el mismo aumento de conocimientos y habilidades independientemente del sistema educativo. En cambio, el análisis debe basarse en las habilidades cognitivas medidas durante el período de escolarización.

Un análisis empírico extendido que relaciona el crecimiento económico a largo plazo con las habilidades cognitivas y otros aspectos de las economías nacionales se basó en un conjunto de datos aportados por 50 países (OECD, 2010). En este informe, se analizó el crecimiento regional del PIB real per cápita entre 1960 y 2000 frente a las puntuaciones promedio de los exámenes de PISA, después de considerar las diferencias en el PIB inicial per cápita en 1960. El resultado sugiere que, dependiendo de los niveles iniciales de ingreso, el crecimiento regional en las últimas cuatro décadas está completamente descrito por las diferencias de los estudiantes respecto a sus habilidades cognitivas.

Razón 3. Impacto en la trayectoria de vida

Se ha aceptado ampliamente que las dificultades de aprendizaje tienen una alta probabilidad de impactar de forma negativa en el transcurso de la vida de los individuos. Estas dificultades son consecuencia de la acción de múltiples factores, incluyendo pedagógicos, ambientales, socioculturales, de salud, etc. Sin embargo, es posible que un desarrollo atípico de las capacidades numéricas básicas — en asociación o no con otros factores mencionados anteriormente — aumente el riesgo de un impacto negativo en la transición a la adultez porque es una condición persistente a lo largo del tiempo y también es resistente a las intervenciones pedagógicas tradicionales. Para probar esta hipótesis, Reigosa-Crespo, Torres, Estévez, Álvarez, Recio, Mosquera, Amor, y Valdés-Sosa (trabajo no publicado) realizaron un estudio de seguimiento de 10 años (2003–13) de individuos con dificultades de aprendizaje asociadas a un desarrollo atípico de las CNB (TA/CNBa, n = 19, nueve mujeres, media edad ($t2$) = 20.3, DE = 2.08) y de otros individuos con dificultades de aprendizaje, pero con desarrollo neurocognitivo típico (TA/CNBt, n = 78, 34 mujeres, media edad ($t2$) = 20.06, DE = 2.78). Como referencia se tomó un grupo de individuos sin dificultades para aprender (n = 76, 33 mujeres, media edad ($t2$) = 18.9, DE = 2.95).

Tabla 3. Riesgo relativo de resultados negativos en el tránsito hacia la adultez en individuos con discalculia y con dificultades en el aprendizaje de las matemáticas.

	Desarrollo atípico de las CNB		Dificultades en el aprendizaje	
	RR	*IC* (95%)	*RR*	*IC* (95%)
Estudios post-secundarios	2.94	0.93–9.2927*	1.36	0.49–3.75 (*ns*)
Educación especial	7.68	0.63–80.71 (*ns*)	9.25	1.20–71.16**
Pobre concentración en clases	1.47	1.15–1.86**	1.02	0.78 1.31 (*ns*)
Problemas en casa	2.94	0.93–9.2927*	1.36	0.49–3.75 (*ns*)
Desempleo	5.33	1.30–21.84**	2.63	0.72–9.54 (*ns*)

Nota: *RR*: riesgo relativo; *IC*: intervalos de confianza
**$p < .001$, *$p < .05$, *ns*: no significativo

Se encontró que el grupo LD/CNBa tuvo mayor riesgo relativo de deserción académica, pobre concentración, desempleo y dificultades de relacionamiento en el hogar en comparación con el grupo LD/CNBt (Tabla 3). Estos resultados apoyan la hipótesis inicial y lanzan una advertencia sobre la urgencia de la identificación temprana y la intervención de las desviaciones del desarrollo neurocognitivo numérico durante la edad escolar.

Una propuesta

Una estrategia de intervención centrada en el desarrollo neurocognitivo, esencialmente requiere herramientas y diseños sostenibles de acuerdo con los contextos globales y locales. Los investigadores del laboratorio de Neurociencias Educacionales del Centro Neurociencias de Cuba han desarrollado herramientas adecuadas para hacer posible este tipo de estrategia (Santos-Febles et al., 2015). Estas herramientas consisten en cuestionarios para la identificación de signos tempranos de desarrollo neurocognitivo atípico, y también, pruebas para perfilar el estado neurocognitivo individual. Este perfil puede facilitar intervenciones centradas en las diferencias individuales en el aula. Un programa que haga uso de estas herramientas debe tener cinco características fundamentales:

'Ciclo cerrado' entre las alertas, el perfil neurocognitivo, la intervención y la monitorización

El enfoque de 'ciclo cerrado' significa que la estrategia implica: (i) la identificación de los signos de alerta en estudiantes; (ii) el perfil de cada estudiante respecto a sus fortalezas y debilidades en las capacidades neurocognitivas; (iii) la intervención personalizada en el aula basada en perfiles neurocognitivos individuales; y (iv) el seguimiento del progreso mediante la reutilización de las herramientas para detectar alertas y obtener perfiles neurocognitivos individuales.

Tomar ventaja de las TIC

La UNESCO y la OIE han declarado que la integración de las TIC en el plan de estudios, tanto para la enseñanza, el aprendizaje y su evaluación, es un objetivo principal para la educación hasta 2030 (UNESCO-IBE, 2016). En línea con este esfuerzo, una estrategia basada en este enfoque aprovecha la disponibilidad actual de las TIC. Las herramientas para detectar alertas se basan en soluciones móviles, mientras que las herramientas para perfilar el desarrollo neurocognitivo son pruebas computarizadas que facilitan la precisión y exactitud en la evaluación. Ambos tipos de recursos han sido desarrollados como aplicaciones cliente-servidor (Santos-Febles et al., 2015). Asimismo, la formación de los educadores en los temas relacionados con las Neurociencias y la educación está diseñada en un entorno e-learning. La intervención debe incluir estrategias para asistir a las diferencias individuales en el aula y también la intervención digital basada en la evidencia.

Capacitar a los maestros

Esta estrategia pretende impulsar la capacitación del maestro de dos maneras. Por un lado, ellos adquieren conocimientos sobre la neurobiología del aprendizaje, el desarrollo neurocognitivo de los estudiantes y su relación con el aprendizaje matemático y también acerca de cómo este conocimiento puede influir en su práctica docente. Por otra parte, los educadores adquieren también habilidades para utilizar las TIC como parte del proceso educativo.

Identificar alertas en el desarrollo neurocognitivo puede ser una manera poderosa de producir intervenciones oportunas y bien dirigidas. Sin embargo, los educadores deben entender las relaciones entre el cerebro, la cognición y el aprendizaje a fin de manejar las diferencias individuales en el desarrollo neurocognitivo en entornos educativos. Las estrategias más eficaces podrían ser aquéllas en las que las diferencias individuales se consideren oportunidades más que problemas que deben abordarse. En este sentido, las diferencias pueden proporcionar al maestro oportunidades para experimentar con estrategias que involucran a todos en actividades significativas, por ejemplo, el aprendizaje cooperativo.

Un enfoque 'ecológico'

La clase es el mejor contexto. Este tipo de estrategia deberá implementarse en las escuelas evitando así prácticas clínicas que se centran principalmente en el diagnóstico y tratamiento de trastornos. El uso indiscriminado de estas prácticas puede conducir a la estigmatización y la segregación. En el marco de esta estrategia, los maestros que reciben formación en Neurociencias y TIC pueden utilizar las herramientas de detección en dispositivos móviles como smartphones o tabletas para identificar alertas en sus estudiantes. Sobre la base de estos primeros signos y también, sobre la información resultante de los perfiles neurocognitivos individuales, los maestros pueden elaborar múltiples estrategias para atender las diferencias individuales en el aula. Este enfoque apoya una perspectiva 'ecológica' porque la estrategia se beneficia de las condiciones naturales del entorno escolar y de las interacciones que ocurren en el proceso de enseñanza-aprendizaje, al tiempo que los procesos y resultados educativos pueden ser impactados positivamente como consecuencia de este tipo de programa.

Una implementación de la propuesta

El Ministerio de Educación del Ecuador en colaboración con el Laboratorio de Neurociencias Educacionales del Centro de Neurociencias de Cuba ha llevado a cabo un estudio piloto que involucró a 20,030 estudiantes de 2do a 6to grado y a 1,598 educadores y otros profesionales de la educación.

Este estudio estuvo en curso entre el año 2014 y 2015. Durante ese período se concluyeron las acciones correspondientes al entrenamiento de los maestros y la detección de signos de alerta en el desarrollo neurocognitivo de los estudiantes. En la Figura 3 se muestran las fases del estudio (A), las herramientas utilizadas en cada fase (B), los cursos de formación para los maestros (C) y la relación encontrada entre las alertas identificadas por los maestros y los perfiles neurocognitivos (D). En este caso, nótese que mientras mayor número de alertas detectadas por el maestro, más atípico resultó ser el desarrollo de las capacidades neurocognitivas de los estudiantes las cuales fueron medidas a través de los instrumentos de evaluación neurocognitiva. Esta relación resultó ser estadísticamente significativa. Al finalizar las fases 1 y 2 se realizó una encuesta de satisfacción anónima a 287 maestros participantes. Esta encuesta contenía proposiciones del tipo: 'los temas impartidos eran conocidos por mí', 'los facilitadores explicaron con claridad', 'analizamos problemas reales de la clase', 'el entrenamiento fue útil para mis prácticas en el aula', 'el entrenamiento tuvo un efecto en el cambio de mi pedagogía — cómo veo a mis estudiantes y por tanto, como les enseño'. Se utilizó una escala de Likert de cinco puntos ('nada'/'poco'/'más o menos'/'bastante'/'mucho'). El promedio de los puntajes en todas las afirmaciones estuvo en el rango de 2 a 3.2 siendo la media 2.9.

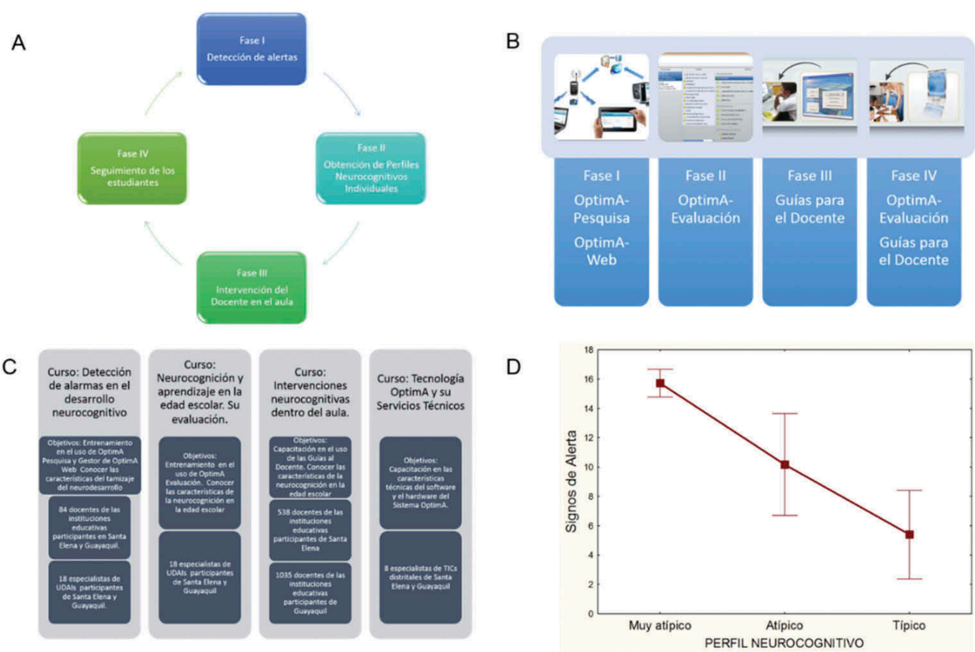

Figura 3. Implementación de una estrategia de intervención del desarrollo neurocognitivo desde la clase.

Las principales dificultades que emergieron estuvieron relacionadas con una alta dependencia de los entrenadores y expertos involucrados en el estudio, pobre conectividad en las escuelas, insuficiente apoyo de las autoridades regionales del sistema educativo y pobre involucramiento de los padres de los estudiantes.

Retos para las políticas y prácticas educativas

Las barreras de traducción

No existe una base de conocimiento integrada que favorezca la efectividad en la diseminación de los hallazgos del laboratorio en las aulas. Se necesitan una plataforma de conocimiento y un lenguaje común entre investigadores y maestros que permita identificar y resolver los malentendidos por esta causa, a medida que surgen, así como para desarrollar conceptos y mensajes que sean científicamente válidos y educativamente informativos (Howard-Jones et al., 2016). Un componente crítico de este esfuerzo es la materialización de recursos financieros que permitan hacer progresos en este sentido, desde el nivel local hasta los gobiernos. Debe tenerse en cuenta que, como práctica mundial. Por ejemplo, el presupuesto invertido en investigación en educación es mucho menor que el invertido en investigación en materia de salud.

La profesión docente

La mayoría de los maestros en servicio no tienen conocimientos previos sobre la ciencia del aprendizaje y los maestros en formación no reciben información al respecto. Eliminar las barreras de traducción es una condición necesaria para enseñar de manera efectiva a los maestros sobre el cerebro, la cognición y el aprendizaje. En línea con esto, una forma reflexiva de capacitar a los maestros es crear cursos en colaboración entre maestros e investigadores sobre ciencia del aprendizaje (Pickering & Howard-Jones, 2007).

Por otro lado, la introducción de la ciencia del aprendizaje en la formación inicial del profesorado requiere la cooperación de los formadores en todos los departamentos y líneas universitarias (Dubinsky, Roehrig, & Varma, 2013). En este sentido, deben establecerse mecanismos efectivos para disminuir las barreras administrativas relacionadas con el desarrollo de arreglos para compartir la matrícula, calcular las asignaciones de tiempo de la facultad, etc. y, también, para coordinar la participación de las facultades que tienen diferentes conjuntos de presiones y prioridades.

Al nivel de las facultades individuales, se debe requerir comunicación y cooperación entre personas con experiencia en cada área. Por ejemplo, los investigadores deben explicar a los educadores conceptos como la sinapsis, la plasticidad neuronal, los períodos sensibles, la recuperación de la memoria; los educadores deben explicar a los investigadores conceptos como el currículo, la evaluación y las trayectorias de aprendizaje.

Un último desafío para introducir la neurobiología del aprendizaje en la formación inicial de docentes es que los formadores deben estar convencidos de que hacerlo dará como resultado la preparación de mejores docentes en el aula. Finalmente, los encargados de formular políticas deben tener en cuenta que, al introducir los conceptos de las neurociencias educacionales como antecedentes para la formación inicial del profesorado, deben considerarse nuevos requisitos de ingreso y formas de calificación para los futuros docentes.

Conclusiones

Existe un cuerpo de evidencias aportado por las Neurociencias Cognitivas que constituye 'conocimiento utilizable' para la práctica educativa. En particular, el establecimiento de un modelo teórico que vincula los niveles biológico, cognitivo y educacional permite poner énfasis en las capacidades neurocognitivas numéricas que actúan como interfaz entre el cerebro y el aprendizaje de las matemáticas. Este vínculo está asociado a características particulares de dichas capacidades que hacen relevante su impacto en la educación. Ellas funcionan sobre redes neuronales que emergen muy temprano en el desarrollo; mantienen un vínculo bidireccional con el aprendizaje en contextos formales y no formales. Este vínculo ocurre a lo largo de la vida, no solo en la infancia temprana; constituyen causa frecuente del descenso o la insuficiente apropiación de conocimiento matemático básico; son específicas para la adquisición de determinados aprendizajes y no otros; pudieran ser modificables a través de una intervención, y son relativamente independientes unas de otras lo cual facilita su evaluación y la realización de acciones formativas altamente direccionadas. En este trabajo se han aportado evidencias que apoyan varias de estas características.

Los maestros y los neurocientíficos pueden desarrollar, de conjunto, intervenciones que contribuyan a potenciar el aprendizaje de las matemáticas. Una estrategia basada en este enfoque puede constituir una oportunidad para cerrar la brecha, que hoy existe, entre las conclusiones derivadas de los experimentos en el laboratorio y las políticas y prácticas educativas. Esta afirmación se apoya en las características claves de la estrategia que se defiende en este artículo: el aula como el mejor escenario y el maestro como el mejor actor para llevarla a cabo, la promoción del uso intensivo de las TIC por parte del maestro así como su formación en tópicos relacionados con la neurobiología del aprendizaje. La implementación de estrategias de este tipo en la clase pudiera contribuir al logro de una educación más equitativa y de calidad para toda la vida.

Disclosure statement / *Conflicto de intereses*

No potential conflict of interest was reported by the authors. / *Los autores no han referido ningún potencial conflicto de interés en relación con este artículo.*

ORCID

Vivian Reigosa-Crespo http://orcid.org/0000-0003-2647-7766
Rosario Torres http://orcid.org/0000-0003-1070-7176
Aymeé Álvarez http://orcid.org/0000-0002-0489-5708

References / Referencias

Arsalidou, M., & Taylor, M. (2011). Does 2 + 2 = 4? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *NeuroImage*, *54*, 2382–2393.

Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London: Macmillan.

Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *46*, 3–18.

Butterworth, B., Reeve, R., Reynol, D. E. F., & Lloyd, D. (2008). Numerical thought with and without worDE: Evidence from indigenous Australian children. *Psychology*, *105*, 13179–13184.

Butterworth, B., & Reigosa-Crespo, V. (2007). Information processing deficits in dyscalculia. In D. Berch & M. Mazzocco (Eds.), *Why is math so hard for some children? The nature and origins of mathematical learning difficulties and disabilities* (pp. 65–81). Baltimore, MD: Paul H Brookes Publishing Co. 140.

Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From brain to education. *Science*, *332*(6033), 1049–53.

Butterworth, B., Zorzi, M., Girelli, L., & Jonckheere, A. (2001). Storage and retrieval of addition facts: The role of number comparison. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *54*, 1005–1029.

Cantlon, J., & Brannon, E. (2007). Basic math in monkeys and college students. *PLoS Biology*, *5*, e328.

Castro, D., & Reigosa-Crespo, V. (2011). Calibrando la línea numérica mental. Evidencias en el desarrollo típico y atípico. *Revista de Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias*, *11*, 17–31.

De Smedt, B., & Gilmore, C. (2011). Defective number module or impaired access? Numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*, 278–292.

Dehaene, S. (1997). *La bosse des maths*. Paris: Odile Jacob Science.

Dehaene, S. (2001). Précis of the number sense. *Mind and Language*, *16*, 16–36.

Dehaene, S., & Marques, J. F. (2002). Cognitive neuroscience: Scalar variability in price estimation and the cognitive consequences of switching to the euro. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *55*, 705–731.

Dubinsky, J. M., Roehrig, G., & Varma, S. (2013). Infusing Neuroscience Into Teacher Professional Development. *Educational Researcher*, *42*, 317–329.

Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Science*, *8*, 307–314.

Gallistel, C. R., & Gelman, R. (2005). Mathematical cognition. In K. Holyoak & R. Morrison (Eds.), *The Cambridge handbook of thinking and reasoning* (pp. 559–588). Cambridge: Cambridge University Press.

Gelman, R., & Gallistel, C. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Gelman, R., & Meck, E. (1983). Preschoolers´ counting: Principles before skill. *Cognition*, *13*, 343–359.

Halberda, J., Mazzocco, M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in nonverbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, *455*, 665–668.

Hart, S., Petrill, S., & Thompson, L. (2010). A factorial analysis of timed and untimed measures of mathematics and reading abilities in school aged twins. *Learning and Individual Differences*, *20*, 63–69.

Howard-Jones, P. A., Varma, S., Ansari, D., Butterworth, B., De Smedt, B., Goswami, U., Laurillard, D., & Thomas, M. S. C. (2016). The principles and practices of educational neuroscience: Comment on Bowers (2016). *Psychological Review*, *123*, 620–627.

Iuculano, T., Tang, J., Hall, C., & Butterworth, B. (2008). Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy. *Developmental Science*, *11*, 669–680

Izard, V., & Dehaene, S. (2007). Calibrating the mental number line. *Cognition*, *106*, 1221–1247.

Jordan, N., Glutting, J., & Ramineni, C. (2010). The importance of number sense to mathematics achievement in first and third grades. *Learning and Individual Differences*, *20*, 82–88.
Karmiloff-Smith, A. (1998). Development itself is the key to understanding developmental disorders. *TrenDE in Cognitive Science*, *2*, 389–398.
Kinzler, K., & Spelke, E. (2007). Core systems in human cognition. *Progress in Brain Research*, *164*, 257–264.
Kovacs, F., Abraira, V., Santos, S., Díaz, E., Gestoso, M., Muriel, A., … Zamora, J. (2007). A comparison of two short education programs for improving low back pain-related disability in the elderly: A cluster randomized controlled trial. *Spine*, *32*, 1053–1059.
Krueger, L. (1984). Perceived numerosity: A comparison of magnitude production, magnitude estimation, and discrimination judgments. *Perception and Psychophysics*, *35*, 536–542.
Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E., & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number worDE: Dissociable systems. *Neuropsychologia*, *41*, 1942–1958.
Lipton, J., & Spelke, E. (2003). Origins of number sense: Large number discrimination in human infants. *Psychological Science*, *14*, 396–401.
Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2005). Preschool children's mapping of number words to nonsymbolic numerosities. *Child Development*, *76*, 978–988. doi:10.1111/cdev.2005.76.issue-5
Mandler, G., & Shebo, B. (1982). Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, *111*, 1–22.
Moyer, R., & Landauer, T. (1967). Time required for judgments of numerical inequality. *Nature*, *215*, 1519–1520.
Nieder, A. (2005). Counting on neurons: The neurobiology of numerical competence. *Nature Review in Neuroscience*, *6*, 177–190.
Nieder, A., & Miller, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *101*, 7457–7462.
OECD. (2010). *The high cost of low educational performance*. Paris: OECD.
Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Science*, *14*, 542–551.
Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, *306*(5695), 499–503.
Pickering, S. J., & Howard-Jones, P. (2007). Educators' views on the role of neuroscience in education: Findings from a study of UK and international perspectives. *Mind, Brain, and Education*, (1), 109–113. doi:10.1111/j.1751-228X.2007.00011.x
Raven, J. C., Court, J., & Raven, J. (1992). *Standard progressive matrices*. Oxford: Oxford Psychologists Press.
Reigosa-Crespo, V., Gonzalez, E., León, T., Torres, R., Mosquera, R., & Valdes-Sosa, M. (2013). Numerical capacities as domain-specific predictors beyond the early mathematics learning: A longitudinal study. *PlosOne*, *8*(11), e79711.
Reigosa-Crespo, V., Valdés-Sosa, M., Butterworth, B., Torres, P., Santos, E., Suárez, R., … Hernández, D. (2012). A large-scale prevalence study of dyscalculia based on numerical cognition principles: The Havana City Survey. *Developmental Psychology*, *48*, 123–135.
Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: A comparison of symbolic vs. non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, *102*, 361–395.
Rubinsten, O., Henik, A., Berger, A., & Shahar-Shalev, S. (2002). The development of internal representations of magnitude and their association with Arabic numerals. *Journal of Experimental Child Psychology*, *81*, 74–92.
Santos-Febles, E., Reigosa-Crespo, V., García-Liashenko, K., Echemendía, A., Plasencia, E., Pujols, G., Álvarez, A., & Eimil, E. (2015) A System to Support Regional Screening Programs to Identify School-age Children at Risk of Neurodevelopmental Disorders. In D. Jaffray (Ed.), *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, June 7–12, 2015, Toronto, Canada. IFMBE Proceedings*, 51 (pp. 1469–1473). Cham: Springer.

UNESCO-IBE. (2016). *Intentional ICT: Curriculum, education and development, in IBE Working Papers on Curriculum Issues (2016)*. Geneva: UNESCO.

Whalen, J., Gallistel, C., & Gelman, R. (1999). Nonverbal counting in humans: The psychophysics of number representation. *Psychological Science*, *10*, 130–137.

Wilson, A., & Dehaene, S. (2007). Number sense and developmental dyscalculia. In D. Coch, G. Dawson, & K. Fischer (Eds.), *Human behaviour, learning, and the developing brain: Atypical development* (pp. 212–238). New York, NY: Guilford Press.

Wynn, K. (1992). Children's acquisition of the number worDE and the counting system. *Cognitive Psychology*, *24*, 220–251.

Wynn, K. (1998). Psychological foundations of number: Numerical competence in human infants. *TrenDE in Cognitive Sciences*, *2*, 296–303.

Xu, F., & Spelke, E. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, *74*, 1–11.