

Infancia y Aprendizaje

Journal for the Study of Education and Development

ISSN: 0210-3702 (Print) 1578-4126 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/riya20>

Model based reasoning and the learning of counter-intuitive science concepts

Stella Vosniadou

To cite this article: Stella Vosniadou (2013) Model based reasoning and the learning of counter-intuitive science concepts, *Infancia y Aprendizaje*, 36:1, 5-33, DOI: [10.1174/021037013804826519](https://doi.org/10.1174/021037013804826519)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1174/021037013804826519>



Published online: 23 Jan 2014.



Submit your article to this journal



Article views: 244



View related articles



Citing articles: 5 [View citing articles](#)

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=riya20>

Model based reasoning and the learning of counter-intuitive science concepts

STELLA VOSNIADOU

National and Kapodistrian University of Athens



Abstract

The capacity to create and manipulate models is a fundamental form of human reasoning and plays an important role in scientific discovery and in the learning of science. In this article I argue that model based reasoning is available even to very young children who are capable of constructing mental models to represent their everyday physical reality. These mental representations can act as mediators in the interpretation of counter-intuitive scientific information as well as in the understanding of cultural artifacts. Model based reasoning can be developed through appropriate instruction in ways that foster conceptual change processes and the learning of science.

Keywords: Model based reasoning, mental models, cultural artifacts, science learning, scientific discovery.

Razonamiento basado en modelos y el aprendizaje de conceptos científicos contra intuitivos

Resumen

La capacidad de crear y manipular modelos es una forma fundamental de razonamiento humano y juega un rol importante en el avance científico y en el aprendizaje de la ciencia. En este artículo, defiendo que el razonamiento basado en modelos está presente incluso en niños muy pequeños, quienes son capaces de construir modelos mentales para representar su realidad del mundo físico. Estas representaciones mentales pueden actuar como mediadoras en la interpretación de información científica contra intuitiva, así como en la comprensión de artefactos culturales. Es posible favorecer el aprendizaje basado en modelos mediante una enseñanza que fomente procesos de cambio conceptual y el aprendizaje de la ciencia.

Palabras clave: Razonamiento basado en modelos, modelos mentales, artefactos culturales, aprendizaje de la ciencia, avance científico.

* English version in pages 5-18 (References in pages 32-33)

** Versión en español en páginas 19-31 (Traducción: Alfredo Bautista)

Author's Address: Stella Vosniadou. National and Kapodistrian University of Athens. Department of Philosophy and History of Science. University Town, A. Ilisia, Athens 15775, Greece. E-mail: svosniad@phs.uoa.gr
Manuscript received: July 1, 2012. *Accepted:* September 20, 2012

I have read Rogoff's (2012) very interesting article in *Infancia y Aprendizaje* about learning in everyday settings without being taught. In contrast, most of my research during the last years has focused on investigating the difficulties students have in learning counter-intuitive science and math concepts that are not part of everyday settings but are taught in schools throughout the world.

Our culture has evolved over the years and through numerous scientific revolutions to create concepts and explanations of phenomena that are rather counter intuitive, such as the Copernican revolution, Newtonian mechanics, Darwin's theory of evolution, the atomic theory of matter, etc. Scientific theories have become part of the cultural knowledge that the citizens of our societies must have. How is it possible for our situated minds to overcome the barriers imposed by everyday experience and folk culture and create such scientific discoveries? And how is it possible for students to undergo the dramatic conceptual changes involved in learning the counter-intuitive concepts and explanations of currently accepted science?

In this article I will focus on the role of model based reasoning in cognitive development and more specifically in the understanding of science concepts. I will argue that the capacity to create and manipulate models is a basic characteristic of the human cognitive system and that the use of model based reasoning by children in the process of understanding cultural tools and artifacts is the foundation on which conceptual change processes can take place.

Sociocultural approaches have stressed the importance of model-based reasoning in the context of using specialized symbolic systems and other cultural artifacts and have analyzed the ways such tools enable scientific and mathematical discourse to develop. However, this research has often ignored the role of students' own beliefs and mental representations in this process. As I have argued extensively elsewhere (Vosniadou, 2003), sociocultural theory presents a valid methodological critique of cognitivism that needs to be addressed. Cognitive activity is not only an internal process but a process distributed between internal, symbolic representations, and the external situational context, including artifacts and symbolic systems. Indeed, it is well accepted now that cognition should be seen as embodied, distributed, and inseparable from cultural, social and historical factors. Contemporary cognitive science is developing contextualized accounts of human cognition and attempts to find ways to view the relationship between the external and internal worlds as a coupled cognitive-cultural system (see Nersessian, 2008). Unfortunately, as pointed out by Halldén, Scheja and Haglund (2008), what constitutes a valid methodological criticism of cognitivism by sociocultural theorists, namely that it has failed to pay adequate attention to social and contextual factors, has been turned into an unjustified ontological claim; namely, that mental objects such as thoughts, ideas, beliefs, etc., do not exist (Roth, 2001; Saljo, 1994; Saljo, Schoultz & Wyndhamn, 2001).

The problem does not lie, however, in the proposition of cognitive science that humans are processors of symbolic structures, but in understanding that these cognitive structures are constructed through participation in socio-cultural activities (see Hatano & Inagaki, 2003; Hutchins, 1995). In other words, learning is not something that happens only inside an individual, or only outside the individual, in terms of activity and practices of participation. Rather, knowledge consists of beliefs and mental representations that can be constructed and changed through participation with other learners and artifacts in sociocultural contexts.

Although such processes may be fundamentally social, adequate attention should be paid to the active role of the individual mind in understanding or constructing new knowledge. As Hatano (1994) aptly expresses discussing the work of another of his Japanese colleagues (Kobayashi, 1994), "although understanding is a social process, it also involves much processing by an active individual mind. Understanding cannot be

induced by social consensus alone. Such a system can be built only through an individual mind's active attempts to achieve integration and plausibility." (p. 195)

Model based reasoning

Model based reasoning involves the construction or retrieval of a mental model or the use of a culturally provided external model and the derivation of inferences through the manipulation of this model. According to Nersessian (2008) a model is an idealized and schematic abstraction that represents the physical system to which it refers by "having surrogate objects and properties, relations, behaviors, or functions of these that are in correspondence with it" (p. 394). Clement (2008) makes a distinction between explanatory and non-explanatory models. An explanatory model, according to Clement, goes beyond what is observed to provide explanations and make predictions about why the system it represents behaves the way it does. An explanatory model provides a description of a hidden, non-observable mechanism that explains how the system works and about the causes behind observable cases. Explanatory models play an important role in science as they are often used to flesh out the semantics of an axiomatic, syntactic theory, mainly in physics. An abstract, axiomatized, theory can usually give rise to a class of models that provide the interpretation of the theory and connect it to the physical world. Giere (1988), following Hesse (1966), argues that models represent in some way the behaviour and structure of the physical system that they represent. They are structural analogs to the physical system. For example, if we can think of the Bohr atom through the model of a system of billiard balls moving in orbits around one ball, with some balls jumping into different orbits at different times, then there are various kinds of analogies that can hold between the model and the real system. According to Morgan and Morrison (1999), models can be of different kinds. Some may be visualisable, others mathematical. In all cases, however, models are integral components of theories. They suggest hypotheses, aid in the construction of theories, and are a source of both explanatory and predictive power. Nersessian (2008) argues that the creation of analogical, visual and simulative models is central to the problem solving practices of scientists and has played an important role in episodes of conceptual change in the history of science. This is the case because theories in their entirety are too complex to entertain all at once. Model building activities, however, are more likely to reveal unnoticed limitations or inconsistencies.

The capacity for mental modeling, Nersessian (2008) argues, is a fundamental form of human reasoning, likely to have evolved as an efficient means of navigating the environment, of anticipating situations, and of solving problems in matters of significance to existence. According to Rumelhart, Hinton, and Williams (1986) it is not the case that we can only manipulate the physical environment and then process it. In addition, we can internalize the representations we create and then process these internalized representations just as if they were external. The ability to form mental representations of the environment is important because it can help to de-situate cognitive activity and can lead to generative thinking.

Greeno (1988) points out that the ability to form mental models is a characteristic of human knowledge that enables generative reasoning about novel situations. A representation is a model with symbolic objects that "behave similarly to the objects in the situations that are represented, so that operations on the objects in the model have effects like those of corresponding operations in the situations. Mental models of this kind incorporate features of the situation that can go beyond the knowledge that the individual can state in propositions or other explicit forms, and that the representations of situations formed as mental models can be constrained by principles that are either known or considered as hypotheses" (p. 28).

Not only we can form mental models of the physical environment, we can also objectify these representations further in the creation of symbolic, cultural artifacts that can then be used as external, prosthetic devices in thinking. As mentioned earlier, sociocultural approaches to learning emphasize the importance of cultural artifacts and the role they play as facilitators of thinking. Such approaches do not however explain how human culture created cultural artifacts in the first place. Model based reasoning is the key to understanding how humans created the rich technological environments of our present societies that are mediated by cultural artifacts. Cultural mediating structures range from symbolic systems like language, mathematics, reading, writing, etc., to artifacts like pencil and paper, calculators and computers. But even traffic lights, supermarket layouts or categorization systems can be considered as symbolic structures that mediate our activities (see Bowker & Starr, 1999).

Individuals can internalize not only their everyday, physical experiences but also the verbal instructions they receive. As Hutchins (1995) points out, not only we can respond to verbal instructions but we can also remember the instruction and use them to tell ourselves what to do, having in this way internalized the instruction. In a similar way we can internalize a cultural artifact like a globe and use it, in its absence, as a mental model on the basis of which we can reason. A globe is a different representation of the earth than that provided by everyday experience. Cultural artifacts like maps and globes can be used in instrumental ways in enriching or revising representations based on everyday experience.

Mental models in novices and experts

Studies comparing problem solving in experts and novices show that adults who are novices in science construct mental models which are very different from those constructed by experts in the domain. For example, according to Kozma, Russell, Jones, Marx and Davis (1996), when chemists see an unknown reddish-brown gas, they may see this object as a model of a "gaseous system" of indeterminate composition, consisting of one or more substances. They might infer that if the vessel contained more than one substance, they could be continually reacting at certain rates, determined in part by the temperature and pressure of the system and in part by properties of the substances. They could infer that at a stable temperature and pressure, these substances would be at 'equilibrium', reacting at equal and opposing rates such that the adjusted ratio of their partial pressures is a constant. On the contrary, when novice students see the same object, their representations of the phenomenon may not include the possible existence of more than one substance. They might think that one property of the solitary substance is that it turns color when heated. These representations do not usually exhibit the dynamic characteristics of the chemists' 'equilibrium system'.

As domain-specific knowledge grows, one's representations of key concepts in the domain become more similar to the scientific models likely to be found in science texts. According to Larkin (1983), significant changes in representations can be found in expert versus novices in mechanics. When given problems with 'blocks' and 'pulleys', she argues, experts see conceptual entities like 'forces'. Novices, however, only see the real objects. They construct mental models that correspond to events or operations in the real world; they envision 'pushing' and 'pulling' the carts and blocks (Larkin, 1983; see also Chi, Feltovitch & Glaser, 1981).

Finally, similar changes happen in the representation of number. Novices in mathematics see numbers as symbols that refer to discrete, physical entities, such as counting numbers. Experts on the other hand have formed a different representation of number as an abstract point on the number line which can take the form of different specific representations (e.g., integers, fractions, decimals) with the properties of density

and continuity (Merenluoto & Lehtinen, 2002; Merenluoto & Palonen, 2007; Vamvakoussi & Vosniadou, 2010).

Our studies of children's reasoning in astronomy provide important information about model based reasoning in children and show that even young children are capable of constructing mental models and that such models are creative constructions that represent children's interpretation of physical reality or of cultural artifacts.

Mental models as constructive interpretations of physical and cultural information

When people reason about the physical world they often construct physical representations in the form of mental models, particularly in situations where the problem cannot be solved on the basis of previously stored verbal information or can be easily deduced from it. For example, when we are asked for instructions or when we need to plan how to drive from position A to position B we create a mental model that allows us to navigate the environment and plan the best route. Mental models can help people draw on implicit physical knowledge in order to solve such problems about the physical world.

In my work I have adopted the construct of the mental model to refer to a representation that is assumed to be analogous to the state of affairs (perceived or conceived) that it represents. Mental models are conceptualized as dynamic structures that are generated from people's concepts and are constrained by the underlying conceptual structures within which these concepts are embedded. I assume that when asked a novel, generative question or presented with a problem about a physical situation, individuals assess whatever conceptual knowledge they have (in the given context) and use it to construct a dynamic, situational, mental model that includes the information necessary to answer the question. For example, it is hypothesized that when asked the questions "If you were to walk for many days in a straight line where would you end up?", "Would you ever reach the end or the edge of the earth?" "Is there an end or an edge to the earth?" individuals use whatever physical knowledge they have to construct a mental model of the earth that includes information about its shape. They then use this information to answer the question.

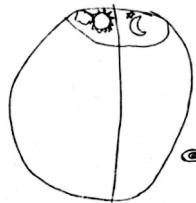
By examining children's drawings or play-dough models of the earth in relation to their verbal responses to questions such as the ones mentioned above, we can obtain information about the nature of their mental representations and about the consistency of their use. This is the case because different mental representations are consistent with different drawings/models and also different kinds of verbal responses. If one constructs the representation of a spherical earth, then the appropriate verbal response should be that the earth does not have an end/edge, and that if one were to walk for many days in a straight line one would eventually return to where one started. The representation of a flat, rectangular or disc-shaped, earth, on the other hand, is consistent with a verbal response indicating that the earth has an end/edge.

Our research has shown that the majority of children in our samples (80 to 85%) can construct and use relatively well defined representations of the earth, of the day/night cycle, or of the seasons, and use them in a consistent fashion to answer our questions and create external representations such as drawings and play-dough models (Samarapungavan, Vosniadou & Brewer, 1998; Vosniadou & Brewer, 1992, 1994). Children's models are not always the same as the models expected on the basis of physical experience and lay culture, or on the basis of currently accepted science. Rather, they are creative constructions, often demonstrating considerable distortion of counter-intuitive science concepts.

For example, some elementary school children believe that there are two earths – a flat one on which people live and a round earth which is a planet up in the sky. Others, like

Venica in the example (Figure 1), believe that the earth is a hollow sphere and that people live on flat ground inside it.

FIGURE 1
Venica's mental model of the earth



Venica (3rd grade) (Subject number 33, hollow sphere model)
(Venica drew the picture of the Earth shown in Figure 1)

Interviewer (I): How come here the earth is flat but before you made it round?

Venica (V): Because you are on the ground and you make that picture like a shape and you made it a square shape and if you'll look up it'll look like a rectangle or something like that and if you go out of earth and go out of earth and go into space you'll see a circle or round.

I: So what is the real shape of the earth?

V: Round.

I: Why does it look flat?

V: Because you are inside the earth.

I: If you walked and walked for many days in a straight line, where would you end up?

V: Somewhere in the desert.

I: What if you kept walking?

V: You can go to states and cities.

I: What if you kept on walking?

V: (No response).

I: Would you ever reach the edge of the earth?

V: No. You would have to be in a spaceship if you're going to go to the end of the earth.

I: Is there an edge to the earth?

V: No. Only if you go up.

Later:

I: Can people fall off the end/edge of the earth?

V: No.

I: Why wouldn't they fall off?

V: Because they are inside the earth.

I: What do you mean inside?

V: They don't fall, they have sidewalks, things down like on the bottom.

I: Is the earth round like a ball or round like a thick pancake?

V: Round like a ball.

I: When you say that they live inside the earth, do you mean they live inside the ball?

V: Inside the ball. In the middle of it.

These results are important not only because they show that even young children are able to construct mental models. More importantly, they demonstrate that such models are neither simple copies of external, phenomenal, reality nor a mere internalization of cultural artifacts. Rather, they are generative hybrids, synthetic conceptions that reveal constructive processes of assimilation of the counter-intuitive scientific information to what is already known.

As explained in Vosniadou and Brewer (1992, 1994), all the models identified in our research can be derived from a synthesis of the scientific information that the earth is a spherical, rotating, astronomical object with an initial, phenomenal, model of a flat, motionless, supported earth, as a physical object, with the sky and solar objects located above its top. For example, both the dual earth and the hollow sphere models manage to

reconcile the scientific information that the earth is a rotating and revolving sphere with children's initial, phenomenal model of a flat earth. The dual earth model does that by simply assuming that there are two earths: one is a planet in space and the other is the 'real' earth on which people live. The hollow sphere model accepts the scientific information that the earth is a sphere but distorts it by assuming that the sphere is hollow and that people live on flat ground inside it.

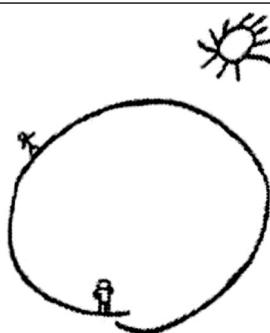
The formation of synthetic models shows that learning science is not the product of a sudden restructuring of existing representations but a slow and gradual process of model revision. A detailed examination of children's responses to our questions shows that there is a progression of more and more advanced synthetic models and that the models that are closer to the scientific concepts increase with age.

Mental models as mediators in the interpretation of cultural artifacts

Mental models are important because they are the point where new information enters the conceptual system and thus affect the interpretation of new information. In the examples discussed below (see Figure 2) we can see how children's mental models of the earth influence the way they interpret a drawing coming from an outside source in order to provide an explanation of the day/night cycle. The examples are taken from a study by Vosniadou and Brewer (1994) in which we presented elementary school children with the drawing of a spherical earth with a person standing on its left side and asked them to "make it so it is day for that person" and then "to make it night for that person".

As can be seen from the examples shown in Figure 2, the children interpreted the drawing in many different ways. For example, Tamara (Drawing No. 1) thought that the drawing was wrong because the person was "outside the earth". When we told her to show us where the person should be, she drew the person inside the earth at the bottom and explained the day/night cycle in terms of the sun being covered by clouds. Allison, on the other hand, accepted our drawing and added the sun to make it day, explaining

FIGURE 2
Examples from children's mental models of the day/night cycle



Drawing No. 1

Tamara (No. 9, Grade 5)

The sun is occluded by clouds of darkness

Interviewer (I): Now can you make it so it is day for that person?

Tamara (T): He's outside the earth.

I: Where should he be?

T: In here (see Figure 2, Drawing 1)

I: ... OK now, make it daytime for him

T: The sun is out here, but it looks like it's in the earth, when it shines

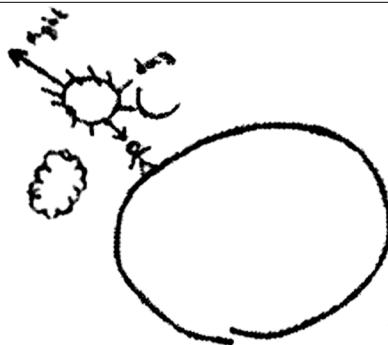
I: OK. What happens at night?

T: The clouds covered it up.

I: Tell me once more how it happens.

T: Cause at 12 o'clock it's dark.

FIGURE 2
(continue)



Drawing No. 3

Allison (No. 52, Grade 1)

The sun moves out into space.

Interviewer (I): Now make it so it is day for that person?

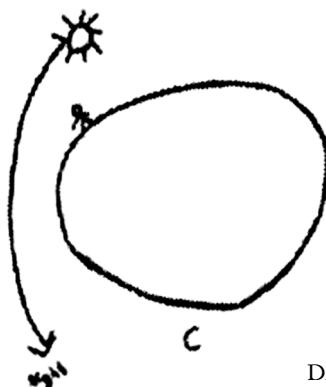
Allison (A): (Child makes Drawing 3 shown in Figure 2) Right here?

I: Whatever you think. Now make it night.

A: It goes in space.

I: Show me. Tell me how it happens.

A: The sun comes back down. It goes into space and when it gets dark the moon comes back out



Drawing No. 5

Timothy (No. 47, Grade 1)

The sun goes down to the other side of the earth (and the moon goes up).

The child makes Drawing 5 shown in Figure 2.

Interviewer (I): Tell me once more how it happens.

Timothy (T): When the moon comes up and the sun goes down.

I: Where was the moon before?

T: Under the earth.

I: Show me. Tell me how it happens.

I: What time was it when goes under the earth?

T: Day

that the sun “goes in space” and “when it gets dark the moon comes back in” (Drawing No. 3). Timothy also accepted our drawing, but had a very different model of the earth and of the day/night. He thought of the earth as a sphere in space and conceptualized the sun as going down to the other side of the earth (Drawing No. 5).

Children’s interpretations of the drawing were consistent with their graphical models of the earth and their beliefs about where people live on the earth. Only the children that

understood the spherical shape of the earth provided interpretations of the day/night cycle based on the earth's axis rotation or revolution around the sun (Vosniadou & Brewer, 1994). It thus appears that, while mental models are constrained by individuals' existing beliefs and presuppositions, they also act as strong constraints themselves on the way new information is interpreted.

Some researchers have challenged the above findings and their interpretation and argue that Vosniadou and colleagues have paid inadequate attention to sociocultural influences on the development of children's understanding of elementary astronomy, and, particularly, that they have ignored the role of cultural artifacts. In two experiments that investigated elementary school children's reasoning about the earth and gravity using physical artifacts such as a globe and a map, Ivarsson, Gillberg, Arvidsson and Broberg (2002) and Schoultz, Säljö and Wyndhamn (2001) argued that young children had sophisticated knowledge of the physical tools provided and could accomplish complex reasoning about the earth and gravity using them. More specifically, Schoultz et al. (2001) found that when their participants had access to a globe, they could all identify the globe as a representation of the earth, they all considered that people could live all across the earth without falling off, and 77% could refer to gravity as an explanatory concept. They concluded that the experiments by Vosniadou and colleagues underestimated children's knowledge, because they did not use a physical tool, a concrete artifact. The presence of the globe as a "shared object of attention", they argued, allows children "to reflect while talking by using (the physical tool) as a prosthetic device for thinking" (p. 115).

Indeed, we agree with Schoultz et al. (2001) that the presence of the globe can facilitate children's thinking because it can, in fact, be used as a prosthetic device to help children think, fulfilling in this way its role as a cultural tool. It is not however the only mode of thinking. As we argue in Vosniadou, Skopeliti and Ikospentaki (2004), there can be different 'modes of knowing and different ways of reasoning' in the process of learning science, from the simple recognition of the culturally accepted scientific facts, models, and artifacts, to the generative use of scientific concepts without any prosthetic devices. The presence of the globe imposes on children the culturally accepted scientific model of the earth in space, and forces them to reason on the basis of this external representation. However, we also argue that even when there is an artifact present, the understanding of this external artifact is not an act of simple and direct cultural transmission, but a constructive act of interpretation, where the external model can be distorted to fit to what the individual already knows while at the same time changing existing beliefs and presuppositions. In other words, we claim that some children will have difficulties reasoning about elementary astronomy, even in the presence of the cultural artifact.

This claim is supported by the findings of an experiment by Ehrlen (2007) who interviewed first grade elementary school children in order to understand how they understood the model of the earth as a globe. She found that some of them could not understand that the globe represented a model of the earth. One of the children called the globe "a map" and did not seem to regard the earth as a spherical planet. Another called the globe "a statue" and did not know whether it looked like the earth, while a third thought that the countries that appeared on the outside of the globe were in reality inside the earth. The following is an excerpt from this last interview:

Margaret: 1st grader

- Interviewer (I): Does the globe look like the earth?
- Margaret (M): Yes, but this is inside (points to the surface of the globe)
- I: You are pointing on the outside, on that country there.
- M: It is inside.
- I: Yes?
- M: Yes.
- I: It is inside. And the people then, where are they?
- M: Inside.

The effect of the presentation of a globe on children's reasoning in elementary astronomy was also investigated in our lab, in an experiment that tested 44 children from grades 1 and 3 (Vosniadou, Skopeliti & Ikospentaki, 2005). In individual interviews, the children were asked to make their own representations of the earth (i.e., drawings and play-dough models) and to indicate where people live on the earth. Then, the same children were presented with the globe and were asked questions regarding the shape of the earth and the areas where people live. The findings showed that the presentation of the globe increased the overall number of scientifically correct responses given by children. However, there was also a marked decrease in the internal consistency of responses, resulting in fragmentation.

One possible explanation for the increase in the number of scientific responses with the presentation of the globe is that the children adopted the externally provided representation and reasoned on the basis of it. Indeed the presence of the globe had an immediate effect on some of the responses of the children, responses that could be read directly from the model and did not require many inferences to be drawn. Characteristic is the example of the question 'Can people live down here at the South Pole?' In this case many children bended to look under the globe to see if there was indeed a country there. Seeing the South Pole, they then answered that yes, people could live 'down there'. The increase in the number of Yes responses (16/20 and 18/22 for the 1st and the 3rd grade respectively) under this condition was noticeable, given the fact that only 5 out of 22 1st graders, and 6 out of 22 3rd graders of the same sample had given a Yes response to the same question when their own play-dough models were used.

This change in responses did not however happen in all the questions leading, as was mentioned earlier, to an increase in the number of internally inconsistent responses. For example, when asked the question about the end/edge of the earth, most of the children retained their original response that there is an end/edge to the earth, even though they had the globe in front of them (65% of the 1st graders and 32% of the 3rd graders). A possible explanation of this response difference may be that in this second question the answer cannot be read directly from the artefact. A superficial interpretation of the globe could possibly justify a reading consistent with the end/edge response (interpreting the end as the sides or bottom of the globe). In the question regarding the South Pole, however, the actual presence of some land indicating that the South Pole is located at the bottom of the globe, together with the previous knowledge of the children that people can get to the South Pole without falling off, make the conclusion more obvious.

To sum up, while the presence of a cultural artifact can help children better understand scientific models it does not by itself solve the problem of science teaching. Understanding a cultural artifact is a constructive act of interpretation influenced by the learners' prior beliefs and representations. These prior beliefs and representations can still intrude influencing the learners' interpretations of the external model creating distortions and fragmentation similar in kind to those observed in the absence of such prosthetic devices.

Model based reasoning can promote conceptual change processes

If the mere presentation of a cultural artifact will not do the job, in what way can then reasoning through mental models lead to conceptual change? If students think in terms of models, then instruction that is model based, rather than only verbally based, should have a better chance in producing conceptual change. As we know, one of the problems of traditional instruction is that it moves students very quickly into memorizing and applying formal quantitative laws into problem-solving situations without teaching students the qualitative models that the scientists themselves use to support their reasoning. On the other hand, when external models and representations are used they are not always adequately exploited in ways that can foster understanding. Teachers often merely rely on the visual qualities of a model to clarify aspects of a scientific explanation

that are not apparent when the explanation is given in a linguistic or mathematical way but do not take into consideration that these visual qualities may not be immediately apparent to children. Instruction needs to address the gap between learners' representations of the physical situation and the ones provided by the cultural artifact. For example, in the case of the earth, it is not adequate to simply show to children the globe and tell them that this is a model of the earth. The children need an explanation that will address the gap between their own, internal representation of the earth and the cultural, external representation. In other words, they need an explanation of how it is possible for the earth to appear flat to our senses but be in fact spherical, and how it is possible for people to live on the 'sides' and 'bottom' of the earth without falling off. This type of instruction requires that we treat children as intelligent thinking beings with beliefs and internal representations that may be different from our own and that should be taken seriously into consideration instead of being dismissed as simplistic or wrong.

Another important source of difficulty in understanding scientific models has to do with children's commitment to a naive, realistic, epistemology. In fact, there is a great deal of research on epistemological development showing that not only elementary school children but also high school and even college students and pre-service teachers have an underdeveloped epistemological understanding of science (Grosslight, Unger, Jay & Smith, 1991; Hoffer & Pintrich, 1997; Smith & Wenk, 2006). They confuse theory with evidence (Kuhn, Amsel & O'Loughlin, 1988), they do not understand the role of ideas in guiding the hypothesis-testing process (Carey, Evans, Honda, Unger & Jay, 1989; Grosslight et al., 1991; Smith, Maclin, Houghton & Hennesey, 2000), they know very little about the nature of scientific models and their relation to perceptual experience and specifically to the observed characteristics of objects and events (Lehrer, Carpenter, Shauble & Putz, 2000), and they do not know how to engage in model-based reasoning (Duschl, Schweinruber & Shouse, 2007).

Students need systematic instruction that will move them from a perceptually based epistemology to a model based epistemology. They need to slowly move from a resemblance based understanding to the understanding of abstract, conceptual models in science that serve an explanatory function. Wiser and Smith (2008) describe how model based activities can allow children to develop from a perception based understanding of matter as something that can be seen, felt, and touched, to visualize decomposing matter into tiny pieces that continue to exist even if they are not directly observable by the senses and as a result to a compositional model of matter according to which any piece of matter, however small, has weight and occupies space.

Model based reasoning can be facilitated if it starts with the externalization of children's implicit physical knowledge into an explicitly coded external model. Such an externalization can help children become consciously aware of their implicit beliefs and presuppositions and make them available for examination, questioning, revision, and further theorizing. By creating an external model, implicit physical knowledge becomes explicit and conceptual and can be subject to hypothesis testing and falsification. In this respect, the externalized mental model can become an important vehicle for conceptual change and the generation of new knowledge. According to Nersessian (2008) a significant method of conceptual innovation and change in science involves iterative processes of constructing, evaluating and revising models that exemplify features of phenomena under investigation. These models are not just aids in reasoning but the means through which one reasons to the new representations.

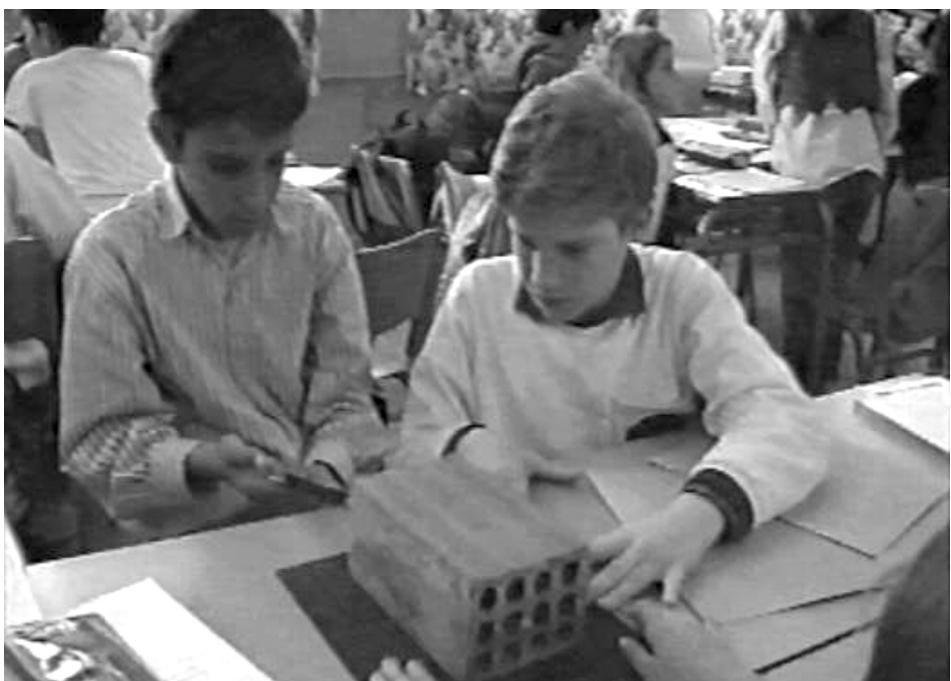
In the last years a number of innovative curricula and instructional environments are being designed to improve students' epistemological sophistication and their abilities to reason with models (Acher, Arcà, & Sanmartí, 2007; Kyriakopoulou & Vosniadou, 2012; Lehrer, Shauble, Strom, & Pligge, 2001; Raghavan & Glaser, 1995; Smith, Maclin, Grosslight, & Davis, 1997; Smith, Snir, Grosslight, 1992). Unfortunately, these experimental attempts have not yet influenced mainstream education in a significant

way. Traditional science instruction at all levels continues to consider science as an accumulation of facts and fails to provide students with an understanding of the role of ideas, models, and hypothesis testing in the scientific discovery. At the same time students' abilities to understand models in the form of textbook illustrations and to reason using these models are grossly overestimated. As Wiser and Smith (2008) argue, an important limitation of existing science curricula is that they overestimate students' abilities to understand scientific explanations and procedures being taught verbally, without having been given the kinds of experiences that would enable them to develop the necessary framework in which such explanations make sense.

In an experimental project that attempted to use a model based learning environment for teaching science to 5th & 6th grade students we made systematic use of models, representational symbols and measurements (Vosniadou, Ioannides, Dimitrakopoulou & Papademetriou, 2001). The students were encouraged to take active control of their learning, express and support their ideas, make predictions and hypotheses and test them by conducting experiments. They worked in small groups and presented their work to the classroom for debate. Metaconceptual awareness was promoted by encouraging students to make their ideas overt, and to test and compare them to those of other students and to scientific explanations.

For example, in teaching mechanics, the students were encouraged to find ways to represent forces while they were slowly introduced to the use of a dynamometer to measure forces. They were also encouraged to construct their own dynamometers using simple materials in order to acquire a better understanding of the function of the dynamometer. The purpose of these activities was to provide students with a concrete instrument with which they could measure and compare abstract forces. The measurement of forces provides children with a tangible understanding of the scientific concept of force as the measurable interaction between two objects, rather than as a property of the object itself (see Figure 3).

FIGURE 3
Measuring forces using a dynamometer



Emphasis was also placed on providing different representational symbols for expressing force and energy to help them separate these two concepts. To this effect, students were provided with vectors as symbols for the representation of forces (see Figure 4). Vectors were introduced not only in graphical representations, as they are commonly used by scientists, but also as three dimensional objects made of cardboard so that they could be used in the classroom in order to represent forces exerted on real, three dimensional objects. Given the lack of an accepted representational symbol for energy, small yellow stickers were used to represent energy units. The stickers were attached on a piece of cardboard to represent objects' energy deposits. The students were shown how to transfer stickers from the energy deposit of the first object to the energy deposit of the other object in order to represent energy transfer. They were also shown how to use the vectors described above to represent forces exerted from an object (e.g. a man kicking a ball) on another object (e.g. the ball). The simultaneous use of two different representational symbols, one for energy and another for force, maximised the probability of differentiating the two concepts. Finally a 'friction model' was also devised (see Vosniadou et al., 2001 for more details).

FIGURE 4
Using cardboard vectors to represent forces



Results showed significant difference between the experimental and control groups in pre-test, post-test comparisons, confirming our hypothesis that the experimental learning environment would result in cognitive gains for the participating students. Further interview analyses and analyses of the classroom discourse helped clarify some of the variables contributing to the observed conceptual changes.

Conclusions

I have argued that model based reasoning plays an important role in scientific discovery as well as in the learning of science. Even young children are capable of creating dynamic and situated mental models and of using them to reason with. These models are

often generative hybrids, synthetic conceptions, revealing constructive processes of assimilation of counter-intuitive scientific information to prior knowledge. This type of model based reasoning can, nevertheless, be an important vehicle for fostering conceptual change and the learning of science and should be exploited in instruction. Systematic model based instruction can slowly move students from perceptually based representations of the physical world to the construction of abstract, conceptual models that are consistent with the representations of current, culturally accepted science.

Traducción al español

He leído el muy interesante artículo de Rogoff (2012) publicado en *Infancia y Aprendizaje* sobre el aprendizaje en contextos cotidianos sin enseñanza deliberada. En contraste, la mayor parte de mi investigación en los últimos años se ha centrado en investigar las dificultades que los estudiantes tienen para aprender conceptos científicos y matemáticos contra intuitivos, que no son parte de contextos cotidianos sino que son enseñados en las escuelas de todo el mundo.

Nuestra cultura ha evolucionado a lo largo de los años a través de numerosas revoluciones científicas para crear conceptos y explicaciones de fenómenos más bien contra intuitivos, tales como la revolución Copernicana, la mecánica Newtoniana, la teoría de la evolución de Darwin, la teoría atómica de la materia, etcétera. Las teorías científicas han llegado a ser parte del conocimiento cultural que los ciudadanos de nuestras sociedades deben tener. ¿Cómo es posible para nuestras mentes situadas superar las barreras impuestas por la experiencia cotidiana y por la cultura popular y crear tales descubrimientos científicos? ¿Y cómo es posible para los estudiantes realizar los dramáticos cambios conceptuales implicados en el aprendizaje de esos conceptos contra intuitivos y de las explicaciones de la ciencia actualmente aceptada?

En este artículo, me centraré en el rol que el razonamiento basado en modelos juega en el desarrollo cognitivo, y más específicamente en la comprensión de conceptos científicos. Argumentaré que la capacidad para crear y manipular modelos es una característica básica del sistema cognitivo humano y que el uso de razonamiento basado en modelos por parte de los niños, en su proceso de comprensión de las herramientas y artefactos culturales, es la base sobre la que tienen lugar los procesos de cambio conceptual.

Los enfoques socioculturales han enfatizado la importancia del aprendizaje basado en modelos en contextos de uso de sistemas simbólicos especializados y de otros artefactos culturales, y han analizado los modos en que tales herramientas posibilitan el desarrollo de discursos científicos y matemáticos. Sin embargo, dichos enfoques con frecuencia han ignorado el rol que las creencias y representaciones mentales de los propios estudiantes juegan en este proceso. Como he defendido de forma extensa en otras publicaciones (Vosniadou, 2003), la teoría sociocultural presenta una crítica metodológica válida del cognitivismo, que necesita ser abordada. La actividad cognitiva no es sólo un proceso interno sino un proceso distribuido entre lo interno, las representaciones simbólicas, y el contexto situacional externo, incluyendo los artefactos y sistemas simbólicos. En efecto, hoy día se acepta que la cognición debe ser concebida como encarnada, distribuida, e inseparable de los factores culturales, sociales e históricos. La ciencia cognitiva contemporánea está desarrollando explicaciones contextualizadas de la cognición humana, y está intentado encontrar modos de analizar la relación entre los mundos externo e interno como un sistema asociado cognitivo-cultural (véase Nersessian, 2008). Lamentablemente, como indican Halldén, Scheja y Haglund (2008), lo que constituye una crítica metodológica válida del cognitivismo por los teóricos socioculturales (es decir, que el cognitivismo no ha prestado la debida atención a los factores sociales y culturales), se ha convertido en un argumento ontológico injustificado: a saber, que los objetos mentales como el pensamiento, las ideas, las creencias, etcétera, no existen (Roth, 2001; Saljo, 1994; Saljo, Schoultz y Wyndhamn, 2001).

El problema no radica, sin embargo, en la propuesta de la ciencia cognitiva de que los humanos somos procesadores de estructuras simbólicas, sino en considerar que las estructuras cognitivas son construidas mediante nuestra participación en actividades socio-culturales (véase Hatano y Inagaki, 2003; Hutchins, 1995). En otras palabras, el aprendizaje no es algo que ocurre sólo dentro de un individuo, o solo fuera del individuo, en términos de su actividad y prácticas de participación. Más bien, el conocimiento está compuesto de creencias y representaciones mentales que pueden ser construidas y cambiadas mediante la participación con otros aprendices y artefactos en contextos socio-culturales.

Aunque tales procesos pueden ser fundamentalmente sociales, debemos prestar una atención adecuada al rol activo que la mente del individuo juega en la comprensión y en la construcción de nuevo conocimiento. Como expresa acertadamente Hatano (1994), discutiendo el trabajo de uno de sus colegas japoneses (Kobayashi, 1994), “aunque la comprensión es un proceso social, también implica mucho procesamiento de la mente activa del individuo. La comprensión no puede ser inducida únicamente por consenso social. Tal sistema sólo puede ser construido mediante los intentos de la mente activa de un individuo para alcanzar integración y plausibilidad” (p. 195, nuestra traducción).

Razonamiento basado en modelos

El razonamiento basado en modelos implica la construcción o recuperación de un modelo mental, o el uso de un modelo externo provisto culturalmente, y la realización de inferencias mediante la manipulación de dicho modelo. De acuerdo con Nersessian (2008), un modelo es una abstracción idealizada y esquemática que representa el sistema físico de referencia “haciendo uso de objetos y propiedades, relaciones, comportamientos, o funciones de éstos que se encuentran en correspondencia con el modelo (p. 394, nuestra traducción). Clement (2008) distingue entre modelos explicativos y no explicativos. Un modelo explicativo, de acuerdo con Clement, va más allá de lo observable para ofrecer explicaciones y predicciones sobre por qué el sistema representado se comporta del modo en que lo hace. Un modelo explicativo ofrece una descripción de un mecanismo escondido, no observable, que explica cómo funciona el sistema y las causas que se hayan tras los casos observados. Los modelos explicativos juegan un rol importante en la ciencia ya que con frecuencia son usados para dar cuerpo al contenido semántico de teorías axiomáticas y sintácticas, principalmente en física. Una teoría abstracta y axiomatizada generalmente puede dar lugar a un tipo de modelos que ofrecen una interpretación de la teoría y la conectan con el mundo físico. Giere (1988), siguiendo a Hesse (1966), plantea que los modelos en cierto modo representan el comportamiento y la estructura del sistema físico representado. Los modelos son análogos estructurales del sistema físico. Por ejemplo, si pensamos en el átomo de Bohr mediante el modelo de un sistema de bolas de billar moviéndose en órbitas alrededor de una bola, con algunas bolas saltando a órbitas diferentes en distintos momentos, tendremos entonces varios tipos de analogías entre el modelo y el sistema físico. De acuerdo con Moran y Morrison (1999), existen diferentes tipos de modelos. Algunos son visuales, otros matemáticos. En cualquier caso, sin embargo, los modelos son componentes integrales de las teorías. Los modelos sugieren hipótesis, ayudan a construir teorías, y son fuente de poder explicativo y predictivo. Nersessian (2008) considera que la creación de modelos analógicos, visuales y simuladores es central en la práctica de solución de problemas de los científicos, y han jugado un rol importante en los episodios de cambio conceptual en la historia de la ciencia. Esto sucede porque las teorías en su integridad son demasiado complejas para contenerse todas en una. Las actividades de construcción de modelos, sin embargo, son más propensas a revelar limitaciones o inconsistencias inadvertidas.

La capacidad de crear modelos mentalmente, como argumenta Nersessian (2008), es una forma fundamental de razonamiento humano. Es probable que esta capacidad haya evolucionado como un modo eficiente de gobernar el ambiente, de anticipar situaciones y de resolver problemas sobre el significado de la existencia. De acuerdo con Rumelhart, Hinton y Williams (1986), no es que primero sólo podamos manipular el ambiente físico y después procesarlo. Además, podemos internalizar las representaciones que creamos y después procesar dichas representaciones internalizadas como si fueran representaciones externas. La capacidad para formar representaciones mentales del ambiente es importante porque puede ayudar a des-situar la actividad cognitiva y facilitar el pensamiento productivo.

Greeno (1988) señala que la habilidad de formar modelos mentales es una característica del conocimiento humano que posibilita el razonamiento generativo en situaciones

novedosas. Una representación es un modelo con objetos simbólicos que “se comportan de forma similar a los objetos en las situaciones representadas, de manera que las operaciones sobre los objetos en el modelo tienen efectos como aquellos que corresponden a las operaciones en la situación. Los modelos mentales de este tipo incorporan características de la situación que pueden ir más allá del conocimiento que el individuo puede expresar proposicionalmente o mediante otras formas explícitas. Además, las representaciones de situaciones formadas como modelos mentales pueden verse restringidas por principios que no son ni conocidos ni considerados como hipótesis” (p. 28, nuestra traducción).

No sólo podemos formar modelos mentales del ambiente físico, sino que también podemos externalizar dichas representaciones en la creación de artefactos simbólicos y culturales, que pueden después ser usados como dispositivos o prótesis externas del pensamiento. Como mencioné anteriormente, los enfoques socioculturales del aprendizaje enfatizan la importancia de los artefactos culturales y el rol que éstos juegan como facilitadores del pensamiento. Dichos enfoques, sin embargo, no explican cómo la cultura humana creó artefactos culturales en primer lugar. El razonamiento basado en modelos es la clave para comprender cómo los humanos hemos creado los ricos ambientes tecnológicos de nuestras sociedades actuales, mediadas por artefactos culturales. Las estructuras culturales mediadoras van desde sistemas simbólicos como el lenguaje, las matemáticas, la lectura, la escritura, etcétera, hasta artefactos como el papel y el lápiz, las calculadoras y los ordenadores. Pero incluso las señales de tráfico, los diseños de los supermercados o los sistemas de categorización pueden ser considerados como estructuras simbólicas que median nuestras actividades (véase Bowker y Starr, 1999).

Los individuos pueden no sólo internalizar sus experiencias físicas y cotidianas, sino también las instrucciones verbales que reciben. Como Hutchins (1995) señala, no sólo podemos responder a instrucciones verbales sino que también podemos recordar la instrucción y usarla para decírnos a nosotros mismos qué hacer, internalizando de este modo la instrucción. De modo similar, podemos internalizar un artefacto cultural como un globo terráqueo y usarlo, en su ausencia, como un modelo mental para basar nuestro razonamiento. Un globo terráqueo es una representación de la Tierra diferente de la representación ofrecida por nuestra experiencia cotidiana. Artefactos culturales como los mapas y los globos terráqueos pueden ser utilizados de forma instrumental, para enriquecer o revisar las representaciones basadas en nuestra experiencia cotidiana.

Modelos mentales en expertos y novatos

Los estudios que comparan la solución de problemas en expertos y novatos muestran que los adultos novatos en ciencias construyen modelos mentales muy diferentes de los que construyen los expertos en el dominio. Por ejemplo, de acuerdo con Kozma, Russell, Jones, Marx y Davis (1996), cuando los químicos ven un gas desconocido de color marrón rojizo, tienden a interpretar este objeto como modelo de un “sistema gaseoso” de composición indeterminada, formado por una o más sustancias. Los químicos inferirían que si el recipiente contenía más de una sustancia, las sustancias podrían estar continuamente reaccionando en ciertas proporciones, determinadas, por una parte, por la temperatura y la presión del sistema y, por otra, por las propiedades de las propias sustancias. Los químicos podrían inferir que a temperatura y presión estables, esas sustancias estarían en ‘equilibrio’, reaccionando en proporciones iguales y opuestas, de modo que la proporción de sus presiones parciales sea constante. Por el contrario, cuando los novatos observan el mismo fenómeno, sus representaciones pueden no incluir la posible existencia de más de una sustancia. Los novatos pensarían que cuando se calientan sustancias aisladas, éstas cambian de color. Estas representaciones generalmente no muestran las características dinámicas de los ‘sistemas en equilibrio’ referidas por los químicos.

A medida que el conocimiento específico de dominio crece, nuestras representaciones de conceptos clave en el dominio se vuelven más similares a los modelos científicos que

suelen encontrarse en los textos de ciencias. De acuerdo con Larkin (1983), existen cambios significativos en las representaciones de expertos y novatos en Mecánica. Esta autora plantea que cuando los expertos afrontan problemas de 'bloques' y 'poleas', éstos interpretan las entidades conceptuales como 'fuerzas'. Los novatos, sin embargo, sólo ven los objetos reales. Los novatos construyen modelos mentales que se corresponden con los eventos o las operaciones del mundo real; visualizan las acciones de 'empujar' o 'tirar' los bloques (Larkin, 1983; véase también Chi, Feltovitch y Glaser, 1981).

Finalmente, cambios similares ocurren en la representación del número. Los novatos en matemáticas ven los números como símbolos referidos a entidades físicas discretas, tal como los números naturales. Por otro lado, los expertos han formado una representación del número diferente, como un punto abstracto sobre la recta numérica, que puede tomar diferentes representaciones (por ejemplo, números enteros, fracciones, decimales) con las propiedades de densidad y continuidad (Merenluoto y Lehtinen, 2002; Merenluoto y Palonen, 2007; Vamvakoussi y Vosniadou, 2010).

Nuestros estudios sobre el razonamiento de los niños en astronomía ofrecen información importante sobre el razonamiento basado en modelos, mostrando que incluso niños muy pequeños son capaces de construir modelos mentales. Tales modelos son construcciones creativas que representan la interpretación del niño sobre la realidad física o sobre los artefactos culturales.

Modelos mentales como interpretaciones constructivas de información física y cultural

Cuando las personas razonan sobre el mundo físico generalmente construyen representaciones externas, sobre todo en situaciones donde el problema no puede ser resuelto mediante información previamente almacenada, ni deducido a partir de información verbal. Por ejemplo, cuando nos piden direcciones o necesitamos planear cómo ir desde la posición A hasta la posición B, creamos un modelo mental que nos permita dominar el ambiente y planificar la mejor ruta. Los modelos mentales pueden ayudar a las personas a basarse en su conocimiento físico implícito para resolver problemas sobre el mundo físico.

En mi trabajo, he adoptado el constructo de modelo mental para referirme a una representación supuestamente análoga al estado del objeto (percibido o concebido) que representa. Los modelos mentales son conceptualizados como estructuras dinámicas que se generan a partir de los conceptos de las personas y se encuentran restringidos por las estructuras conceptuales subyacentes en las que los conceptos se alojan. Considero que cuando a los individuos se les plantea una pregunta novedosa o generativa, o cuando se les presenta un problema sobre una situación física, éstos valoran el conocimiento conceptual que tienen (en el contexto dado) y lo usan para construir un modelo dinámico y situacional, que incluye la información necesaria para responder a la pregunta o problema. Por ejemplo, mi hipótesis es que cuando a los individuos se les hacen preguntas como "Si caminaras en línea recta durante días, ¿dónde terminarías?", "¿Encontrarías en algún momento el final o el borde de la Tierra?", "¿Tiene la Tierra un final o un borde?", los individuos usan cualquier tipo de conocimiento físico que tienen para construir un modelo mental de la Tierra, el cual incluye información sobre su forma. Los individuos usan entonces esta información para responder a la pregunta.

Examinando los dibujos producidos por los niños, o comparando sus modelos de plastilina con sus respuestas verbales a preguntas como las mencionadas arriba, podemos obtener información sobre la naturaleza de sus representaciones mentales y sobre la consistencia en su uso. Esto ocurre porque diferentes representaciones mentales son consistentes con diferentes dibujos/modelos y también con diferentes tipos de respuestas verbales. Si uno construye la representación de una Tierra esférica, entonces una respuesta verbal apropiada debería ser que la Tierra no tiene fin/borde. Si alguien camina durante días en línea recta, por tanto, terminaría eventualmente en el mismo lugar donde comenzó. Por otro

lado, la representación de una Tierra plana, rectangular o con forma de disco es consistente con respuestas verbales que indican que la Tierra tiene fin/borde.

Nuestra investigación ha mostrado que la mayoría de los niños de nuestras muestras (80% al 85%) puede construir y usar representaciones relativamente bien definidas de la Tierra, del ciclo día/noche, o de las estaciones, y utilizarlas de forma consistente para responder a nuestras preguntas y crear representaciones externas como dibujos y modelos de plastilina (Samarapungavan, Vosniadou y Brewer, 1998; Vosniadou y Brewer, 1992, 1994). Los modelos de los niños no son siempre iguales a los modelos esperables a partir de su experiencia cotidiana y de la cultura popular, ni similares a los de la ciencia actualmente aceptada. Sus modelos son más bien construcciones creativas, que con frecuencia demuestran una distorsión considerable de conceptos científicos contra intuitivos.

Por ejemplo, algunos niños de escuela primaria creen que hay dos Tierras – la Tierra plana, donde viven las personas, y la Tierra redonda, que es un planeta suspendido en los cielos. Otros, como Venica en el ejemplo (Figura 1), creen que la Tierra es una esfera hueca y que la gente vive sobre una superficie plana dentro de ella.

FIGURA 1
Modelo mental de la Tierra realizado por Venica



Venica (tercer grado). (Participante número 33, modelo de esfera hueca)
(Venica dibujó la figura de la Tierra mostrada en la Figura 1).

Entrevistador (E): ¿Por qué aquí la Tierra es plana pero antes la hiciste redonda?

Venica (V): Porque tú estás sobre la Tierra y tú haces esa foto como una forma y la haces con forma cuadrada, y si miras hacia arriba parece como un rectángulo o algo así y si te vas fuera de la Tierra y te vas fuera de la Tierra y vas al espacio, entonces la verás como un círculo o redonda.

E: Entonces, ¿cómo es la verdadera forma de la Tierra?

V: Redonda.

E: ¿Por qué parece plana entonces?

V: Porque tú estás dentro de la Tierra.

E: Si tú caminaras y caminaras por muchos días en línea recta, ¿dónde terminarías?

V: En algún lugar del desierto.

E: ¿Y si continuaras caminando más?

V: Puedes ir a los estados y las ciudades.

E: ¿Y si caminaras más y más todavía?

V: (No responde).

E: ¿Llegarías en algún momento al borde de la Tierra?

V: No. Tendrías que estar en una nave espacial si estás yendo al fin de la Tierra.

E: ¿Tiene un borde la Tierra?

V: No. Sólo si subes hacia arriba.

Después:

E: ¿Puede la gente caerse desde el final/el borde de la Tierra?

V: No.

E: ¿Por qué no se caerían?

V: Porque están dentro de la Tierra.

E: ¿Qué quierés decir con dentro?

V: No se caen, tienen aceras, cosas abajo como en el suelo.

E: ¿La Tierra es redonda como una pelota o redonda como una tarta?

V: Redonda como una pelota.

E: Cuando dices que la gente vive dentro de la Tierra, ¿quieres decir que viven dentro de la pelota?

V: Dentro de la pelota. En medio de la pelota.

Estos resultados son importantes no sólo porque muestran que incluso los niños pequeños son capaces de construir modelos mentales. Principalmente, estos resultados demuestran que los modelos no son ni simples copias de la realidad fenomenológica externa, ni una mera internalización de los artefactos culturales. Más bien, los modelos son híbridos generativos, concepciones sintéticas que revelan procesos constructivos de asimilación de información científica contra intuitiva respecto a los que los niños ya saben.

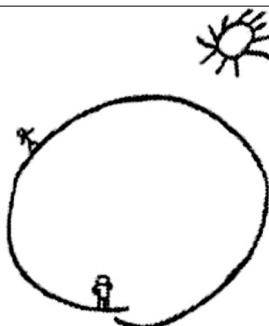
Como se explica en Vosniadou y Brewer (1992, 1994), todos los modelos identificados en nuestras investigaciones derivan de una síntesis de información científica (la Tierra es un objeto astronómico esférico que rota) con un modelo inicial fenomenológico (la Tierra es un objeto físico plano, apoyado e inmóvil, con el cielo y otros objetos solares por encima). Por ejemplo, tanto el modelo dual de Tierra como el modelo de esfera hueca logran reconciliar la información científica de que la Tierra es una esfera que rota, con el modelo inicial fenomenológico de los niños de que la Tierra es plana. El modelo dual de la Tierra lo hace simplemente asumiendo que existen dos Tierras: una es un planeta en el espacio y la otra es la Tierra 'real', donde viven las personas. El modelo de esfera hueca acepta la información científica de que la Tierra es una esfera, pero lo distorsiona asumiendo que la esfera es hueca y que la gente vive en una superficie plana dentro de ella.

La formación de modelos sintéticos muestra que el aprendizaje de la ciencia no es el producto de una reestructuración súbita de representaciones existentes, sino un proceso lento y gradual de revisión de modelos. Un examen detallado de las respuestas de los niños a nuestras preguntas muestra una progresión hacia modelos sintéticos cada vez más avanzados, y que los modelos más cercanos a los modelos científicos se incrementan con la edad.

Los modelos mentales como mediadores en la interpretación de artefactos culturales

Los modelos mentales son importantes porque son el punto de encuentro entre la nueva información y el sistema conceptual, y por tanto afectan la interpretación de dicha nueva información. En los ejemplos discutidos más abajo (véase Figura 2), podemos ver cómo los modelos mentales de los niños sobre la Tierra influyen en el modo en que éstos interpretan dibujos provenientes de fuentes externas, producidos para explicar el ciclo día/noche. Los ejemplos han sido tomados del estudio de Vosniadou y Brewer (1994), donde presentamos a niños de escuela primaria el dibujo de una Tierra esférica con una persona de pie en el lado izquierdo, y les pedimos "haz que sea de día para esa persona" y luego "haz que sea de noche para esa persona".

FIGURA 2
Ejemplos de modelos mentales infantiles sobre el ciclo día/noche



Dibujo No. 1

Tamara (Participante número 9, quinto grado)

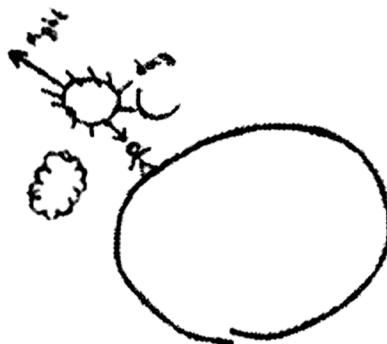
El sol se oculta tras nubes de oscuridad

Entrevistador (E): ¿Puedes hacer que sea de día para esa persona?

Tamara (T): El está fuera de la Tierra.

FIGURA 2
(continuación)

- E: ¿Dónde debería estar entonces?
 T: Aquí (ver Figura 2, Dibujo 1)
 E: ... Vale, entonces, haz que sea de día para él.
 T: El sol está aquí, pero parece como que está en la Tierra, cuando brilla...
 E: Vale. ¿Qué ocurre por la noche?
 T: Las nubes lo ocultan.
 E: Dime una vez más como ocurre eso.
 T: Porque a las 12 de la noche está oscuro.

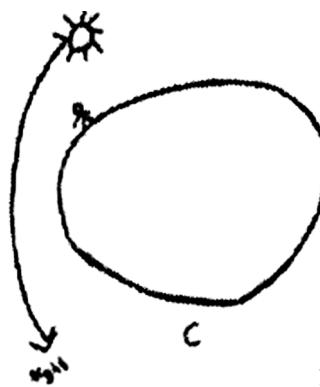


Dibujo No. 3

Allison (Participante número 52, primer grado)

El sol se mueve en el espacio

- Entrevistador (E): ¿Puedes hacer que sea de día para esa persona?
 Allison (A): (La niña hace el Dibujo 3 mostrado en la Figura 2). ¿Aquí?
 E: Donde tú pienses. Ahora haz que sea de noche.
 A: Se va al espacio.
 E: Muéstrame. Dime cómo pasa eso.
 A: El sol vuelve a bajar. Va hacia el espacio y, cuando se pone oscuro, la luna vuelve a salir.



Dibujo No. 5

Timothy (Participante número 47, primer grado)

El sol baja por la otra cara de la Tierra (y la luna sube)

El niño hace el Dibujo 5 mostrado en la Figura 2.

Entrevistador (E): Dime una vez más cómo sucede eso.

Timothy (T): Cuando la luna sube, el sol baja.

E: ¿Dónde estaba la luna antes?

T: Bajo la Tierra.

E: Muéstrame. Dime cómo ocurre.

E: ¿Qué hora era cuando la luna está bajo la Tierra?

T: Durante el día.

Como puede observarse en los ejemplos mostrados en la figura 2, los niños interpretaron el dibujo de muchos modos diferentes. Por ejemplo, Tamara (Dibujo No. 1) pensó que el dibujo era erróneo porque la persona estaba “fuera de la Tierra”. Cuando le pedimos que nos mostrara dónde debía estar la persona, Tamara dibujó a la persona dentro de la Tierra, en la parte inferior, y explicó que el ciclo día/noche se debe a que las nubes cubren el sol. Allison, por otro lado, aceptó nuestro dibujo y añadió el sol para hacer que fuera de día, explicando que el sol “sale al espacio” y “cuando se pone oscuro, la luna vuelve a salir” (Dibujo No. 3). Timothy también aceptó nuestro dibujo, pero tenía un modelo muy diferente sobre la Tierra y el ciclo día/noche. Él planteó que la Tierra es una esfera en el espacio y que el sol baja por la cara opuesta de la Tierra (Dibujo No. 5).

Las interpretaciones que los niños hicieron de los dibujos fueron consistentes con sus modelos gráficos sobre la Tierra y con sus creencias acerca de dónde vive la gente en ella. Sólo los niños que comprendían la forma esférica de la Tierra ofrecieron interpretaciones del ciclo día/noche basadas en su eje de rotación o en su rotación alrededor del sol (Vosniadou y Brewer, 1994). Parece por tanto que, aunque los modelos mentales están restringidos por las creencias y presupuestos existentes en los individuos, también constituyen importantes mediadores en el modo en que la nueva información es interpretada.

Algunos investigadores han desafiado los hallazgos arriba descritos y su interpretación, argumentando que Vosniadou y sus colegas no prestaron la debida atención a las influencias socioculturales en el desarrollo de la comprensión de la astronomía elemental por parte de los niños, y, más particularmente, que ignoraron el rol de los artefactos culturales. En dos experimentos que investigaban el razonamiento de niños de escuela primaria sobre la Tierra y la gravedad, utilizando artefactos físicos como un globo terráqueo y un mapa, Ivarsson, Gillberg, Arvidsson y Broberg (2002) y Schoultz, Säljö y Wyndhamn (2001) argumentaron que los niños tienen sofisticados conocimientos sobre dichas herramientas físicas y pueden utilizarlos para realizar razonamientos complejos sobre la Tierra y la gravedad. Más específicamente, Schoultz *et al.* (2001) encontró que cuando los participantes tenían acceso a la esfera terráquea, todos ellos podían identificar la esfera como una representación de la Tierra, todos ellos expresaban que las personas podrían vivir en cualquier punto de la Tierra sin caerse, y el 77% podían referirse a la gravedad como concepto explicativo. Los autores concluyeron que los experimentos de Vosniadou y sus colegas subestimaban el conocimiento de los niños, ya que no se les permitió utilizar una herramienta física, un artefacto concreto. La presencia del globo terráqueo como un “objeto compartido de atención”, argumentan los autores, permite a los niños “reflexionar mientras hablan utilizando (la herramienta física) como un dispositivo de prótesis para el pensamiento” (p. 115, nuestra traducción).

En efecto, estamos de acuerdo con Schoultz *et al.* (2001) en que la presencia del globo terráqueo puede facilitar el pensamiento de los niños porque puede, de hecho, ser utilizado como un dispositivo para ayudarles a pensar, cumpliendo de este modo su rol como herramienta cultural. Como planteamos en Vosniadou, Skopeliti y Ikospentaki (2004), puede haber diferentes ‘modos de conocimiento y diferentes modos de razonamiento’ en el proceso de aprendizaje de la ciencia, desde el simple reconocimiento de los hechos, modelos y artefactos científicos culturalmente aceptados, hasta el uso generativo de conceptos científicos sin ningún uso de dispositivos protésicos. La presencia del globo terráqueo impone sobre los niños el modelo científico culturalmente aceptado de la Tierra en el espacio, y les fuerza a razonar con base en esta representación externa. Sin embargo, nosotros también planteamos que incluso cuando hay un artefacto cultural presente, la comprensión de este artefacto externo no es un acto de transmisión cultural simple y directa, sino un acto constructivo de interpretación, donde el modelo externo puede ser distorsionado para ajustarse a lo que el individuo ya sabe, cambiando sus creencias y presupuestos existentes. En otras palabras, planteamos que algunos niños tendrán dificultades al razonar sobre astronomía elemental, incluso en presencia del artefacto cultural.

Este planteamiento se sustenta en los hallazgos del experimento de Ehrlen (2007), quien entrevistó alumnos de primer grado para explorar su comprensión del modelo de la Tierra como globo terráqueo. La autora encontró que algunos niños no comprendían que el globo terráqueo representaba un modelo de la Tierra. Uno de los niños llamaba "mapa" al globo y no parecía considerar que la Tierra era un planeta esférico. Otro niño llamaba "estatua" al globo y no sabía si se parecía a la Tierra, mientras que un tercer niño pensaba que los países que aparecían fuera del globo terráqueo estaban en realidad dentro de la Tierra. A continuación presentamos un extracto de esta última entrevista:

Margaret: Alumna de primer grado

- Entrevistador (E): ¿Se parece el globo terráqueo a la Tierra?
- Margaret (M): Sí, pero esto está dentro (señala la superficie de la Tierra)
- E: Estás señalando el exterior, sobre ese país de ahí.
- M: Está dentro.
- E: ¿Sí?
- M: Sí.
- E: Está dentro. ¿Y la gente entonces dónde está?
- M: Dentro.

El efecto de la presentación de un globo terráqueo sobre el razonamiento en astronomía elemental de los niños fue también investigado en nuestro laboratorio, en un experimento con 44 niños de primer y tercer grado (Vosniadou, Skopeliti y Ikospentaki, 2005). Durante entrevistas individuales, pedimos a los niños producir sus propias representaciones de la Tierra (mediante dibujos y modelos de plastilina) e indicarnos dónde vive la gente. Después, presentamos a los mismos niños el globo terráqueo y les hicimos preguntas respecto a la forma de la Tierra y las áreas donde vive la gente. Los resultados mostraron que la presentación del globo incrementó el número de respuestas científicamente correctas. Sin embargo, también identificamos una notable disminución en la consistencia interna de las respuestas, que presentaban mayor fragmentación

Una posible explicación del incremento en el número de respuestas científicamente correctas con la presentación del globo terráqueo es que los niños adoptaron la representación ofrecida externamente y razonaron con base en ella. En efecto, la presencia del globo terráqueo tuvo un efecto inmediato sobre algunas de las respuestas de los niños, respuestas que podían ser leídas directamente desde el modelo y no requerían la realización de inferencias. Es característico el ejemplo de la pregunta '¿Puede la gente vivir ahí abajo, en el Polo Sur?' En este caso, muchos niños se inclinaban a mirar bajo el globo terráqueo para ver si realmente existía algún país allí. Viendo el Polo Sur respondían que sí, la gente puede vivir 'ahí abajo'. El incremento en el número de la respuesta Sí (16/20 y 18/22 para primer y tercer grado, respectivamente) en esta condición es notable, dado que sólo 5 de los 22 estudiantes de primer grado y 6 de los de tercer grado en la misma muestra habían dicho Sí ante la misma pregunta mientras usaban sus propios modelos de plastilina.

Sin embargo, este cambio en las respuestas no ocurría en todas las preguntas, como se mencionó anteriormente, ocasionando un incremento en el número de respuestas internamente inconsistentes. Por ejemplo, cuando se preguntaba a los niños sobre el fin/borde de la Tierra, la mayoría de ellos mantenía su respuesta inicial (*i.e.*, la Tierra tiene fin/borde), pese a tener el globo terráqueo frente a ellos (65% de los estudiantes de primer grado y 32% de los de tercer grado). Una posible explicación de estas diferencias es que la respuesta a esta segunda pregunta no puede ser leída directamente desde el artefacto. Una interpretación superficial del globo terráqueo podría posiblemente justificar una lectura consistente con la respuesta del fin/borde (interpretando el fin como los lados o la parte baja del globo terráqueo). En la pregunta sobre el Polo Sur, sin embargo, la presencia real de una porción de Tierra indicando que el Polo Sur se localiza en la parte de abajo del globo, junto con el anterior conocimiento de los niños de que la gente puede llegar al Polo Sur sin caerse, hacen esta conclusión más obvia.

En resumen, aunque la presencia de un artefacto cultural puede ayudar a los niños a comprender mejor los modelos científicos, no soluciona por sí misma el problema de la enseñanza de la ciencia. Comprender un artefacto cultural es un acto constructivo de interpretación, influenciado por las creencias y representaciones previas del aprendiz. Dichas creencias y representaciones pueden intervenir mediando las interpretaciones del aprendiz respecto del modelo externo, creando distorsiones y una fragmentación similar a la observada en ausencia de tales dispositivos protésicos.

El razonamiento basado en modelos puede promover procesos de cambio conceptual

Si la mera presentación de un artefacto cultural no soluciona el problema, ¿entonces de qué modo el razonamiento mediante modelos puede producir el cambio conceptual? Si los estudiantes piensan en términos de modelos, entonces la enseñanza basada en modelos debería tener más probabilidades de producir cambio conceptual que la enseñanza exclusivamente verbal. Como es bien sabido, uno de los problemas de la enseñanza tradicional es que lleva muy rápidamente a los estudiantes a memorizar y aplicar leyes formales cuantitativas en situaciones de solución de problemas, sin enseñarles los modelos cualitativos que los mismos científicos utilizan para apoyar su razonamiento. Por otro lado, los modelos y representaciones externas no siempre son usados de maneras que fomenten adecuadamente la comprensión. Con frecuencia, los profesores sólo se apoyan en las características visuales de los modelos para clarificar aspectos de las explicaciones científicas que no son evidentes de forma verbal o matemática, pero sin considerar que dichas características visuales pueden no ser inmediatamente obvias para los estudiantes. La enseñanza necesita reducir la distancia entre las representaciones del aprendiz sobre el mundo físico y las representaciones ofrecidas por los artefactos culturales. Por ejemplo, en el caso de la tierra, no es adecuado simplemente mostrar a los niños el globo terráqueo y decirles que es un modelo de la tierra. Los niños necesitan una explicación que reduzca la distancia entre sus propias representaciones internas sobre la Tierra y la representación cultural externa. En otras palabras, necesitan una explicación de cómo es posible que la Tierra parezca plana ante nuestros sentidos pese a ser en realidad esférica, y de cómo es posible que la gente viva en los lados y en el sur sin caerse. Este tipo de enseñanza requiere que tratemos a los niños como seres inteligentes, como seres con creencias y representaciones internas que pueden ser diferentes a las nuestras, y que deben ser cuidadosamente tomadas en consideración en vez de ser tachadas de simplistas o incorrectas.

Otra fuente de dificultad importante en la comprensión de modelos científicos tiene que ver con la internalización de una epistemología ingenua y realista por parte de los aprendices. De hecho, una gran cantidad de investigación sobre desarrollo epistemológico muestra que no sólo los estudiantes de escuela elemental sino también de secundaria, incluso de niveles universitarios y profesores en formación, tienen una comprensión epistemológica poco desarrollada sobre la ciencia (Grosslight, Unger, Jay y Smith, 1991; Hoffer y Pintrich, 1997; Smith y Wenk, 2006). Confunden teoría con evidencia (Kuhn, Amsel y O'Loughlin, 1988), no entienden el rol de las ideas para guiar el proceso de prueba de hipótesis (Carey, Evans, Honda, Unger y Jay, 1989; Grosslight *et al.*, 1991; Smith, Maclin, Houghton y Hennesey, 2000), saben muy poco acerca de la naturaleza de los modelos científicos y sobre su relación con la experiencia perceptiva, específicamente sobre las características de los objetos y eventos observados (Lehrer, Carpenter, Shauble y Putz, 2000), o cómo razonar con base en modelos (Duschl, Schweinruber y Shouse, 2007).

Los estudiantes necesitan una enseñanza sistemática que les ayude a pasar de una epistemología basada en la percepción a una epistemología basada en modelos. Necesitan pasar lentamente de una comprensión apoyada en similitudes a una comprensión de

modelos conceptuales y abstractos, dotados de potencial explicativo. Wiser y Smith (2008) describen cómo las actividades basadas en modelos pueden permitir a los niños avanzar desde una comprensión de la materia fundamentada en la percepción (es decir, materia como algo que puede ser visto, sentido y tocado), hasta visualizar la descomposición de la materia en piezas minúsculas, que continúan existiendo incluso sin ser directamente observables por los sentidos y, como resultado, desarrollar un modelo composicional de la materia, de acuerdo al cual cualquier pieza de materia, sin importar su tamaño, tiene peso y ocupa espacio.

El razonamiento basado en modelos puede ser facilitado si comienza con la externalización del conocimiento físico implícito de los niños en un modelo externo explícitamente codificado. Tal externalización puede ayudar a los niños a tomar conciencia de sus creencias y presupuestos implícitos y a hacerlos disponibles para ser examinados, cuestionados, revisados e incluso teorizados. Creando modelos externos, el conocimiento físico implícito se convierte en conocimiento explícito y conceptual, pudiendo someterse a prueba de hipótesis y falsación. En este sentido, los modelos mentales externalizados pueden convertirse en un importante vehículo para el cambio conceptual y la generación de nuevo conocimiento. De acuerdo con Nersessian (2008), un método significativo para la innovación y el cambio conceptual en ciencias implica procesos iterativos de construcción, evaluación y revisión de modelos que ejemplifican las características de los fenómenos investigados. Dichos modelos no son sólo ayudas para el razonamiento sino el medio mediante el cual las personas razonamos sobre nuevas representaciones.

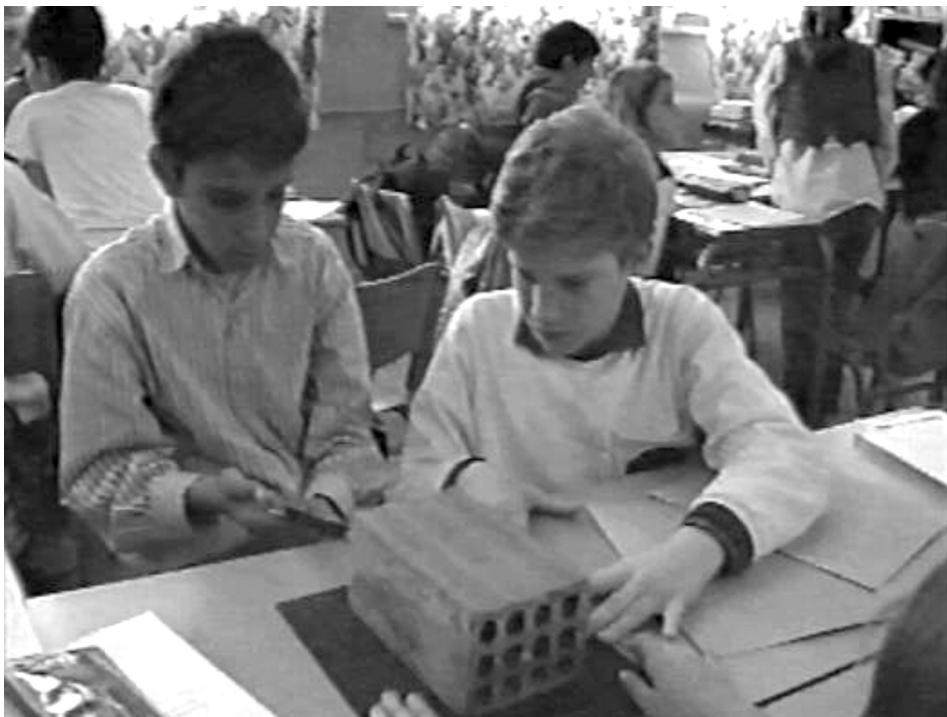
En los últimos años, se han diseñado numerosos currículos y contextos de enseñanza innovadores para mejorar la sofisticación epistemológica de los estudiantes, así como sus habilidades para razonar con modelos (Acher, Arcà y Sanmartí, 2007; Kyriakopoulou y Vosniadou, 2012; Lehrer, Shauble, Strom y Pligge, 2001; Raghavan y Glaser, 1995; Smith, Maclin, Grosslight y Davis, 1997; Smith, Snir y Grosslight, 1992). Lamentablemente, dichas experiencias todavía no han influido en la corriente dominante en educación, de manera significativa. La enseñanza tradicional de la ciencia en todos los niveles continúa presentándola como una acumulación de hechos, sin promover la comprensión de los estudiantes sobre el rol que las ideas, los modelos y las pruebas de hipótesis juegan en el avance científico. Al mismo tiempo, las habilidades de los estudiantes para comprender los modelos presentados en las ilustraciones de los libros de texto y para razonar usando dichos modelos están extremadamente sobreestimadas. Como plantean Wiser y Smith (2008), una limitación importante de los currículos de ciencia es que sobreestiman las habilidades de los estudiantes para comprender explicaciones y procedimientos explicados verbalmente, sin brindarles experiencias con las que desarrollar el necesario marco conceptual en que dichas explicaciones cobran sentido.

En un proyecto experimental con estudiantes de ciencia de quinto y sexto grado, tratamos de promover contextos de aprendizaje basado en modelos mediante el uso sistemático de modelos, símbolos representacionales y mediciones (Vosniadou, Ioannides, Dimitrakopoulou y Papademetriou, 2001). Animamos a los estudiantes a tomar un rol activo en su aprendizaje, a expresar y justificar sus ideas, a hacer predicciones e hipótesis y a ponerlas a prueba realizando experimentos. Los estudiantes trabajaron en pequeños grupos y presentaron su trabajo ante la clase para debatirlo. Para promover su conciencia metaconceptual, animamos a los estudiantes a expresar sus ideas abiertamente, examinándolas y comparándolas con las de otros estudiantes y con las explicaciones científicas.

Por ejemplo, al enseñar problemas de Mecánica, pedimos a los estudiantes encontrar diferentes modos de representar fuerzas, a la vez que les introdujimos lentamente en el uso del dinamómetro para medir fuerzas. También les animamos a construir sus propios dinamómetros utilizando materiales simples, con el objetivo de adquirir una mejor comprensión de la función del dinamómetro. El propósito de dichas actividades era ofrecer a los estudiantes un instrumento concreto con el que medir y comparar fuerzas abstractas. La medición de fuerzas provee a los estudiantes de una comprensión tangible del concepto

científico de fuerza como la interacción medible entre dos objetos, más que como una propiedad del objeto en sí mismo (Figura 3).

FIGURA 3
Midiendo fuerzas usando un dinamómetro



También pusimos énfasis en ofrecer a los estudiantes diferentes símbolos representacionales para expresar los conceptos de fuerza y energía, y para ayudarles a diferenciar ambos conceptos. Para ello, les dimos vectores como símbolos para la representación de fuerzas (véase Figura 4). Los vectores fueron presentados no sólo en representaciones gráficas, como generalmente los usan los científicos, sino también como objetos tridimensionales de cartón, que pudieran ser usados en la clase para representar fuerzas ejercidas sobre objetos reales y tridimensionales. Dada la falta de un símbolo representacional aceptado para la energía, utilizamos unas pequeñas pegatinas amarillas para representar las unidades de energía. Las pegatinas fueron pegadas sobre una pieza de cartón para representar la cantidad de energía de los objetos. Se enseñó a los estudiantes cómo transferir pegatinas desde el depósito de energía del primer objeto al depósito de energía de otro objeto para representar la transferencia energética. También enseñamos a los estudiantes a usar los vectores arriba descritos para representar las fuerzas ejercidas desde un objeto (por ejemplo, un hombre dando una patada a una pelota) hacia otro objeto (por ejemplo, la pelota). El uso simultáneo de dos diferentes símbolos representacionales, uno para la energía y otro para la fuerza, maximizó la probabilidad de diferenciar los dos conceptos. Finalmente, diseñamos un 'modelo de fricción' fue diseñado (para más detalles, véase Vosniadou *et al.*, 2001).

Los resultados mostraron diferencias significativas entre los grupos control y experimental en las comparaciones pre- y post-test, confirmando nuestra hipótesis de que el contexto experimental de aprendizaje resultaría en ganancia de conocimiento para los estudiantes participantes. El análisis de entrevistas y del discurso en clase nos ayudó a clasificar algunas de las variables que contribuyeron a los cambios conceptuales observados.

FIGURA 4
Usando vectores de cartón para representar fuerzas



Conclusiones

En este artículo, he argumentado que el aprendizaje basado en modelos juega un rol importante en el avance científico, así como en el aprendizaje de la ciencia. Incluso los niños pequeños son capaces de crear modelos mentales dinámicos y situados, y de utilizarlos para razonar con ellos. Dichos modelos son con frecuencia híbridos generativos, concepciones sintéticas, revelando procesos constructivos de asimilación de información científica contra intuitiva con el conocimiento previo. Este tipo de razonamiento basado en modelos puede, sin embargo, ser un importante vehículo para fomentar el cambio conceptual y el aprendizaje de la ciencia, y debería ser utilizado en la enseñanza. La enseñanza sistemáticamente basada en modelos tiene potencial para mover gradualmente a los estudiantes desde sus representaciones del mundo físico, basadas en la percepción, hacia la construcción de modelos conceptuales abstractos, consistentes con las representaciones de la actual ciencia culturalmente aceptada.

References

- ACHER, A., ARÇA, M. & SANMARTÍ, N. (2007). Modeling as a teaching learning process for understanding materials. A case study in primary education. *Science Education*, 91, 398-418.
- BOWKER, G. & STAR, S. L. (1999). *Sorting things out: Classification and its consequences*. Cambridge, MA: MIT Press.
- CAREY, S., EVANS, R., HONDA, M., UNGER, C. & JAY, E. (1989). An experiment is when you try and see if it works: middle school conception of science. *International Journal of Science Education*, 11, 514-529.
- CHI, M., FELTOVITCH, P. & GLASER, R. (1981). Categorization and representation in physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- CLEMENT, J. (2008). The role of explanatory models in teaching for conceptual change. In S. Vosniadou (Ed.), *The international handbook of research on conceptual change* (pp. 417-452), New York: Routledge.
- DUSCHL, R. A., SCHWEINRUBER, H. A. & SHOUSE, A. W. (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades K-8*. Washington, DC: The National Academies Press.
- EHRLÉN, K. (2007). *Conceptions and artefacts: Children's understanding of the earth in the presence of visual representations*. Doctoral Thesis in Education. Stockholm University, Sweden.
- GIERE, R. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- GREENO J. (1988). Situations, mental models and generative knowledge. Palo Alto, CA: Institute for Research on Learning.
- GROSSLIGHT, L., UNGER, C., JAY, E. & SMITH, C. (1991). Understanding models and their use in science. Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 799-822.
- HALLDÉN, O., SCHEJA, M. & HAGLUND, L. (2008). The contextuality of knowledge. An intentional approach to meaning making and conceptual change. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 509-532). London: Taylor & Francis Group, Inc.
- HATANO, G. (1994). Introduction. *Human Development*, 37, 189-197.
- HATANO, G. & INAGAKI, K. (2003). When is conceptual change intended? A cognitive-sociocultural view. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 407-427). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- HESSE, M. (1966). *Models and analogies in science*. Notre Dame, IN: University of Indiana Press.
- HOFFER, B. & PINTRICH, P. (1997). The development of epistemological theories: Beliefs about knowledge and knowing and their relation to learning. *Review of Educational Research*, 67 (1), 88-140.
- HUTCHINS, E. (1995). *Cognition in the wild*. Cambridge, MA: MIT Press.
- IVARSSON, T., GILLBERG, C., ARVIDSSON, T. & BROBERG, A. G. (2002). The Youth Self-Report (YSR) and the Depression Self-Rating Scale (DSRS) as measures of depression and suicidality among adolescents. *European Child and Adolescent Psychiatry*, 11, 31-37.
- KOBAYASHI, A. (1994). Coloring the field: gender, 'race' and the politics of fieldwork. *The Professional Geographer* 46, 73-80.
- KOZMA, R., RUSSELL, J., JONES, J., MARX, N. & DAVIS, J. (1996). The use of multiple, linked representations to facilitate science understanding. In S. Vosniadou, E. de Corte, R. Glaser & H. Mandl (Eds.), *International perspectives on the design of technology-supported learning Environments* (pp. 41-60). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- KUHN, D., AMSEL, E. & O'LOUGHIN, M. (1988). *The development of scientific thinking skills*. Orlando, FL: Academic.
- KYRIAKOPOULOU, N. & VOSNIADOU, S. (2012). *The relation between conceptual change in physical science, theory of mind and personal epistemology and implications for science instruction*. Paper presented in the 8th International Conference on Conceptual Change, September 1-4, University of Trier, Germany.
- LARKIN, J. (1983). The role of problem representation in physics. In D. Gentner & A. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 75-98). Hillsdale: NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- LEHRER, R., CARPENTER, S., SHAUBLE, L. & PUTZ, A. (2000). Designing classrooms that support inquiry. In J. Ministrel I & E. van Zee (Eds.), *Inquiring into inquiry learning and teaching in science* (pp. 80-99). Washington, DC: American Association for the Advancement of Science.
- LEHRER, R., SCHAUBLE, L., STROM, D. & PLIGGE, M. (2001). Similarity of form and substance: Modeling material kind. In S. Carver & D. Klahr (Eds.), *Cognition and instruction: Twenty-five years of progress* (pp. 39-74). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- MERENLUOTO, K. & LEHTINEN, E. (2002). Conceptual change in mathematics: Understanding the real numbers. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice* (pp. 233-258). Dordrecht: Kluwer.
- MERENLUOTO, K. & PALONEN, T. (2007). When we clashed with the real numbers: Complexity of conceptual change in number concept. In S. Vosniadou, A. Baltas & X. Vamvakoussi (Eds.), *Reframing the conceptual change approach in learning and instruction* (pp. 247-263). Oxford, UK: Elsevier.
- MORGAN, M. S. & MORRISON, M. (Eds.) (1999). *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*. Cambridge: Cambridge University Press.

- NERSESSIAN, N. J. (2008). Mental modelling, in conceptual change. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 391-416). New York: Routledge.
- RAGHAVAN, K. & GLASER, R. (1995). Model-based analysis and reasoning in science: The MARS curriculum. *Science Education*, 79, 37-61.
- ROGOFF, B. (2012). Learning without lessons: Opportunities to expand knowledge. *Infancia y Aprendizaje*, 35 (2), 233-241. [Trans. into Spanish by A. Bautista & B. Rogoff, Aprender sin lecciones: oportunidades para expandir el conocimiento. *Infancia y Aprendizaje*, 35 (2), 242-250].
- ROTH, W. M. (2001). Situating Cognition. *The Journal of Learning Sciences*, 10 (1), 27-61.
- RUMELHART, D. E., HINTON, G. E. & WILLIAMS, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature* 323, 533-536.
- SÄLJÖ, R. (1994). Minding action: conceiving of the world versus participating in cultural practices. *Journal of Nordic Educational Research*, 14, 71-80.
- SÄLJÖ, R., SCHOUTZ, J. & WYNDHAMN, J. (2001). Heavenly talk. A discursive approach to conceptual knowledge and conceptual change in children's understanding of elementary astronomy. *Human Development*, 44, 103-118.
- SAMARAPUNGAVAN, A., VOSNIADOU, S. & BREWER, W. F. (1998). mental models of the earth, sun and the moon: Indian children's cosmologies. *Cognitive Development*, 11, 491-521.
- SCHOUTZ, J., SÄLJÖ, R. & WYNDHAMN, J. (2001). Heavenly talk: discourse, artifacts, and children's understanding of elementary astronomy. *Human Development*, 44, 103-118.
- SMITH, C. L., MACLIN, D., HOUGHTON, C. & HENNESEY, M. G. (2000). Sixth-grade students' epistemologies of science: The impact of school experiences on epistemological development. *Cognition and Instruction*, 18 (3), 349-422.
- SMITH, C., & WENK, L. (2006). Relations among three aspects of first-year college students epistemologies of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 43 (8), 747-785.
- SMITH, C., MACLIN, D., GROSSLIGHT, L. & DAVIS, H. (1997). Teaching for understanding: A comparison of two approaches to teaching students about matter and density. *Cognition and Instruction*, 15 (3), 317-393.
- SMITH, C., SNIR, J. & GROSSLIGHT, L. (1992). Using conceptual models to facilitate conceptual change: The case of weight/density differentiation. *Cognition and Instruction*, 9 (3), 221-83.
- VAMVAKOSSI, . & VOSNIADOU, S. (2010). How many decimals are there between two fractions? Aspects of secondary school students' reasoning about rational numbers and their notation. *Cognition and Instruction*, 28 (2), 181-209.
- VOSNIADOU, S. (2003). Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning. In G. M. Sinatra & P. R. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp. 377-406). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- VOSNIADOU, S. & BREWER, W. F. (1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24, 535-585.
- VOSNIADOU, S. & BREWER, W. F. (1994). Mental models of the day/night cycle. *Cognitive Science*, 18, 123-183.
- VOSNIADOU, S., IOANNIDES, CH., DIMITRAKOPOULOU, A. & PAPADEMITRIOU, E. (2001). Designing Learning Environments to Promote Conceptual Change in Science, *Learning and Instruction*, 11 (4-5), 381-419.
- VOSNIADOU, S., SKOPELITI, I. & IKOSPENTAKI, K. (2004.) Modes of Knowing and Ways of Reasoning in Elementary Astronomy. *Cognitive Development*, 19, 203-222
- VOSNIADOU, S., SKOPELITI, I. & IKOSPENTAKI, K. (2005). reconsidering the role of artifacts in reasoning: childrens' understanding of the globe as a model of the earth. *Learning and Instruction*, 15, 333-351.
- WISER, M. & SMITH, C. L. (2008). Learning and teaching about matter in grades K-8: When should the atomic-molecular theory be introduced? In S. Vosniadou (Ed.), *The international handbook of research on conceptual change* (pp. 205-239). New York: Routledge.