

Seymour Papert

## Desafío a la mente

### Capítulo 7

#### Las raíces de Logo:

#### Piaget y la inteligencia Artificial

EL LECTOR ya ha encontrado una variedad de situaciones de aprendizaje reunidas por un común conjunto de ideas sobre qué es lo que contribuye a un aprendizaje efectivo. En este capítulo abordaremos estas ideas y las fuentes teóricas que las informan. Entre éstas nos concentraremos en dos: primero, la influencia de Piaget y segundo, la influencia de la teoría computacional y la inteligencia artificial.

He hablado antes del “aprendizaje piagetiano”, el aprendizaje espontáneo y natural de las personas en interacción con su ambiente, y lo he contrastado con el aprendizaje dirigido por un programa característico de las escuelas tradicionales. Pero la contribución de Piaget a mi trabajo ha sido mucho más profunda, más teórica y filosófica. En este capítulo presentaré a un Piaget muy distinto del que la mayoría de la gente espera. No hablaremos de estadios, ni habrá énfasis en lo que los niños de determinadas edades pueden o no pueden aprender hacer. Más bien me ocuparé de Piaget el epistemólogo, pues sus ideas han hecho una contribución a la teoría del aprendizaje basada en el conocimiento que he venido describiendo, una teoría que no divorcia el estudio de cómo se aprende la matemática del estudio de la matemática misma.

Pienso que estos aspectos epistemológicos del pensamiento de Piaget han sido descuidados porque hasta ahora no ofrecían posibilidades de acción en el mundo de la educación tradicional. Pero en un ambiente computacionalmente rico, el ambiente educacional de la próxima década, esto no sucederá. En el capítulo 5 y en el desarrollo de la idea misma de la Tortuga hemos visto ejemplos de cómo una investigación epistemológica de lo que es fundamental en un sector de la matemática, la matemática de sistemas diferenciales, ya ha dado su recompensa en diseños educacionales eficaces y concretos. **El Piaget de la teoría de los estadios es esencialmente conservador, casi reaccionario, al enfatizar lo que los niños no pueden hacer.** Yo trato de revelar un Piaget más revolucionario, cuyas ideas epistemológicas puedan expandir los límites conocidos de la mente humana. Durante todos estos años no pudieron hacerlo

por la falta de un medio de utilización, una tecnología que la computadora matética ahora comienza a ofrecer.

El Piaget presentado en este capítulo es nuevo también en otro sentido. Esta colocado en un marco teórico tomado de una zona del mundo de las computadoras de la cual no hemos hablado en forma directa, pero cuyas perspectivas han estado implícitas a lo largo de este libro, la de la inteligencia artificial, o IA. La definición de inteligencia artificial puede ser estricta o amplia. En sentido estricto, la IA se ocupa de ampliar la capacidad de las máquinas para realizar funciones que se considerarían inteligentes si las realizan personas. Su objetivo es construir máquinas, y al hacerlo, se la puede considerar una rama de la ingeniería avanzada. Pero para construir dichas máquinas, generalmente es necesario reflexionar no solamente sobre la naturaleza de las máquinas sino también sobre la naturaleza de las funciones inteligentes que deben ser realizadas.

Por ejemplo, para hacer una máquina que pueda recibir instrucciones en lenguaje natural, es necesario sondear profundamente la naturaleza del lenguaje. A fin de hacer una máquina capaz de aprender, tenemos que sondear profundamente la naturaleza del aprendizaje. Y de este tipo de investigación surge la definición más amplia de inteligencia artificial: la de una ciencia cognoscitiva. En este sentido, la IA comparte su territorio con disciplinas más antiguas como la lingüística y la psicología. Pero lo propio de la IA es que su metodología y su estilo de teorización remiten marcadamente a teorías de computación. En este capítulo utilizaremos este estilo de teorizar de varias maneras: primero, para reinterpretar a Piaget; segundo, para desarrollar las teorías del aprendizaje y de la comprensión que conforman nuestro diseño de situaciones educacionales; y tercero, en una manera en cierto modo más inusual. El propósito de la IA es dar forma concreta a ideas sobre el pensamiento que antes pudieron parecer abstractas, incluso metafísicas. Es esta cualidad concretizadora lo que hace tan atractivas las ideas de la IA para muchos psicólogos contemporáneos. Proponemos enseñar IA a los niños de modo que ellos también puedan pensar más concretamente sobre los procesos mentales. En tanto los psicólogos utilizan las ideas de la IA para construir teorías científicas formales sobre los procesos mentales, los niños usan las mismas ideas de manera más informal y personal para pensar sobre sí mismos. Y obviamente me parece que esto es bueno en tanto la capacidad de expresar los procesos de pensamiento nos permite mejorarlos.

Piaget se ha descrito a sí mismo como epistemólogo. ¿Qué quiere él decir con eso? Cuando él habla sobre el niño en desarrollo, realmente está hablando al mismo tiempo sobre el desarrollo del conocimiento. Esta afirmación nos conduce a un contraste entre los modos epistemológico y psicológico de comprender el aprendizaje. En la perspectiva psicológica, el enfoque se centra en las leyes

que rigen al sujeto del aprendizaje en lugar de aquello que se aprende. Los conductistas estudian los esquemas de refuerzo, los teóricos de la motivación estudian el impulso, los teóricos de la gestalt estudian la buena forma. Para Piaget, la separación entre el proceso de aprendizaje y lo que se aprende es un error. Para comprender como aprende un niño el número, tenemos que estudiar el número. Y tenemos que estudiar la estructura del número, una empresa matemáticamente seria. Es por esto que no es en absoluto inusual encontrar a Piaget refiriéndose en el mismo párrafo a la conducta de los niños pequeños y a las preocupaciones de los teóricos matemáticos. Para hacer más concreta la idea de estudiar el aprendizaje concentrándose en la estructura de lo que se aprende, observaremos un caso muy concreto de aprendizaje de la vida diaria y veremos cuan diferente aparece desde una perspectiva psicológica y desde una epistemológica.

Consideraremos el aprender a andar en bicicleta. Si no conociéramos el asunto, andar en bicicleta nos parecería algo realmente notable. ¿Qué lo hace posible? Se podría buscar la respuesta estudiando al ciclista para descubrir que atributos especiales (velocidad de reacción, complejidad del funcionamiento cerebral, intensidad de la motivación) contribuyen a su desempeño. Esta investigación por interesante que sea, es irrelevante para la verdadera solución del problema. Las personas pueden andar en bicicleta porque ésta, una vez en movimiento, es intrínsecamente estable. Una bicicleta sin ciclista arrojada por una pendiente empinada no se caerá; seguirá indefinidamente ladera abajo. La construcción geométrica de la horquilla frontal asegura que si la bicicleta se inclina hacia la izquierda el manubrio gire hacia el mismo lado, haciendo así que la bicicleta doble y produzca una fuerza centrífuga que le impulse hacia la derecha contrarrestando la tendencia a caer. La bicicleta sin ciclista se mantiene en equilibrio perfectamente bien. Con un ciclista novato se caerá. Esto se debe a que el novato tiene intuiciones erróneas sobre el equilibrio, y congela la posición de la bicicleta de manera tal que los propios mecanismos correctivos de ésta no pueden actuar libremente. Así es que aprender a andar en bicicleta no significa aprender a mantener el equilibrio, sino aprender a no perturbar ese equilibrio, aprender a no interferir.

Lo que hemos hecho aquí es comprender un proceso de aprendizaje gracias a una percepción más profunda de lo que se está aprendiendo. Los principios psicológicos no tienen nada que ver con ello. Y así como hemos comprendido la manera en que las personas andan en bicicleta estudiando las bicicletas, Piaget nos ha enseñado que debemos comprender como aprenden los niños el número a través de una comprensión más profunda de lo que el número es.

Los matemáticos interesados en la naturaleza del número han examinado el problema desde distintos puntos de vista. Un enfoque, asociado con los forma-

listas, trata de entender el número estableciendo axiomas para captarlo. Un segundo enfoque, asociado con Bertrand Russell, busca definir el número reduciéndolo a algo más fundamental, por ejemplo, la lógica y la teoría de conjuntos. Aunque ambos enfoques son válidos, y capítulos importantes en la historia de la matemática, ninguno de ellos arroja luz sobre la cuestión de por qué se puede aprender el número. Pero existe una escuela matemática que sí lo hace, si bien no era ésta su intención. Se trata del estructuralismo de la escuela de Bourbaki. Bourbaki es el seudónimo adoptado por un grupo de matemáticos franceses que se propusieron articular una teoría uniforme para la matemática. La matemática debía ser una, no una colección de subdisciplinas, cada una con su propio lenguaje y su propia línea de desarrollo. La escuela avanzó en esta dirección reconociendo una cantidad de bloques de construcción que denominó "estructura madre". Estas estructuras tienen algo en común con nuestra idea de los microcosmos. Imaginemos un microcosmos en el cual las cosas pudieran ser ordenadas pero no tuvieran ninguna otra propiedad. Saber cómo organizar ese mundo es, en términos de la escuela de Bourbaki, la estructura madre del orden. Un segundo microcosmos permite relaciones de proximidad, y esta es la estructura madre de la topología. Una tercera estructura tiene que ver con la combinación de entidades para producir otras nuevas; es la micro-estructura algebraica. La escuela de Bourbaki logra la unificación de la matemática considerando las estructuras más complejas, como la aritmética, como combinaciones de estructuras más simples de las cuales las más importantes son las tres estructuras madre. Esta escuela no tenía ninguna intención de elaborar una teoría del aprendizaje. Su propósito era que su análisis estructural fuera una herramienta técnica que los matemáticos utilizaran en su trabajo diario. Pero la teoría de las estructuras madre es una teoría del aprendizaje. Es una teoría de cómo es posible aprender un número. Al mostrar cómo es posible descomponer la estructura de la aritmética en estructuras más simples, pero igualmente significativas y coherentes, los matemáticos están señalando un camino matemático hacia el conocimiento numérico. No es sorprendente que Piaget, que explícitamente buscaba una teoría del número que explicara su desarrollo en los niños, desarrollara un conjunto paralelo y similar de construcciones, y más tarde, al "descubrir" la escuela de Bourbaki, pudiera utilizar las construcciones de ésta para elaborar las propias.

Piaget observó que los chicos desarrollan estructuras intelectuales coherentes que parecían corresponder muy estrechamente a las estructuras madre de Bourbaki. Recordemos, por ejemplo, la estructura de Bourbaki de orden; de hecho, desde la más temprana edad, los niños comienzan a desarrollar gran aptitud para ordenar cosas. Las estructuras madre topológica y algebraica tienen similares precursores evolutivos. ¿Qué es lo que las hace susceptibles de aprendizaje? Antes que nada, cada una de ellas representa una actividad co-

herente en la vida del niño, que en principio podría ser aprendida y dotada de sentido independientemente de las otras.

En segundo lugar, la estructura de conocimiento de cada una tiene una especie de simplicidad interna que Piaget ha elaborado en su teoría de los *groupements*, que será analizada más adelante en términos levemente distintos. En tercer lugar, si bien estas estructuras madre son independientes, el hecho de que se aprenden en forma paralela y de que comparten un sistema formal común es indicio de que son soportes recíprocos; el aprendizaje de cada una facilita el de las demás.

Piaget ha utilizado estas ideas para dar una explicación del desarrollo de una variedad de dominios del conocimiento en términos de un conjunto legítimo y coherente de estructuras como procesos dentro de la mente infantil. Él describe estas estructuras internas en interacción permanente con el mundo externo, pero su énfasis teórico recae sobre los sucesos internos. Mi perspectiva es más intervencionista. Mi meta es la educación, no la simple comprensión. De manera que en mi propia reflexión he colocado mayor énfasis en dos dimensiones implícitas pero no elaboradas en la propia obra de Piaget: el interés en las estructuras intelectuales que podrían desarrollarse, en oposición a aquellas que realmente se desarrollan actualmente en el niño, y el diseño de ambientes de aprendizaje que estén en consonancia con ellas. Se puede usar la Tortuga para ilustrar ambos intereses: primero la identificación de un poderoso conjunto de ideas matemáticas que no suponemos representadas, al menos no en forma desarrollada, en los niños; segundo, la creación de un objeto transicional, la Tortuga, que puede existir en el ambiente del niño y entrar en contacto con las ideas. Como matemático sé que una de las ideas más potentes en la historia de la ciencia fue la del análisis diferencial. A partir de Newton, la relación entre lo particular y lo general determinó considerablemente el quehacer de los matemáticos. Sin embargo, esta idea no ha encontrado un lugar en el mundo infantil, en gran parte porque el acceso tradicional a la matemática depende de una infraestructura de capacitación matemática formal. Para la mayoría de la gente, nada es más natural que pensar que las ideas matemáticas más avanzadas son inaccesibles para los niños. Desde la perspectiva que he tomado de Piaget, es de suponer que se hallaran conexiones. De modo que salimos a la búsqueda de alguna. Pero encontrar las conexiones no significaba simplemente inventar un nuevo tipo de inteligente pedagogía "motivadora". Significaba un programa de investigación que incluye lo más poderoso de la idea diferencial y lo separara de los accidentes de formalismos inaccesibles. El objetivo era entonces vincular estas estructuras científicamente fundamentales con otras psicológicamente poderosas. Y éstas fueron por supuesto las ideas subyacentes al

círculo dibujado por la Tortuga, a los microcosmos de la física y a la Tortuga tacto-sensora.

¿En qué sentido el ambiente natural es una fuente de microcosmos, en realidad una fuente de una red de microcosmos? Limitemos el ambiente natural total a aquellas cosas dentro de él que puedan servir como fuente para un microcosmos específico, un microcosmos de formación de pares, de correspondencia término a término. Muchas de las cosas que ven los niños vienen en pares: madres y padres, cuchillos y tenedores, tazas y platos. Y también a ellos se les pide que sean activos constructores de pares. Se les pide que ordenen medias, que pongan la mesa con un lugar para cada persona, y que repartan golosinas. Cuando los chicos concentran su atención en los pares se encuentran en un microcosmos autoconstruido, un microcosmos de pares, en el mismo sentido con que colocamos a nuestros alumnos en los microcosmos de las Tortugas de geometría y de física. En ambos casos, el microcosmos relevante está despojado de complejidad, es simple, comprensible. En ambos casos se permite al niño jugar libremente con sus elementos. Si bien existen limitaciones en los materiales, no las hay para la exploración de las combinaciones. Y en ambos casos el poder del ambiente radica en que es "rico en descubrimientos".

En el trabajo con computadoras se hace más evidente que los niños construyen sus propios microcosmos personales. La historia de Débora al final del capítulo 4 es un buen ejemplo. LOGO le dio la oportunidad de construir un microcosmos particularmente nítido, su mundo de giro a DERECHA 30". Pero ella podría haber hecho algo parecido dentro de su cabeza sin ninguna computadora. Por ejemplo, podría haber decidido interpretar las instrucciones del mundo real en términos de un conjunto simple de operaciones. Tales fenómenos intelectuales no son generalmente visibles a los observadores, como tampoco podían saber mis profesores de álgebra que yo usaba engranajes para pensar las ecuaciones. Pero se pueden ver si uno observa con suficiente atención. Robert Lawler, miembro del grupo LOGO del Massachusetts Institute of Technology, lo demostró con máxima claridad en su investigación doctoral. Lawler se propuso observar todo lo que hacía una niña de seis años, su hija Miriam, durante un periodo de seis meses. La riqueza de la información que obtuvo le permitió armar un cuadro de la micro-estructura de las crecientes capacidades de Miriam. Por ejemplo, durante este periodo Miriam aprendió a sumar, y Lawler pudo demostrar que esto no había consistido en la adquisición de un procedimiento lógicamente uniforme. Un modelo más apropiado de su aprendizaje de la suma es que ella puso en relación operativa una cantidad de microcosmos personales, cada uno de los cuales podía ser rastreado hasta experiencias anteriores identificables.

He dicho que Piaget es un epistemólogo, pero no he precisado de que clase. La epistemología es la teoría del conocimiento. De acuerdo con su etimología, el término epistemología podría aplicarse a todo el saber sobre el conocimiento, pero tradicionalmente ha sido de una manera algo especial; esto es para describir el estudio de las condiciones de validez del conocimiento. La epistemología de Piaget no se ocupa de la validez del conocimiento sino de su origen y desarrollo. El se ocupa de la génesis y evolución del conocimiento, y señala este hecho describiendo su campo de estudio con la expresión "epistemología genética". La epistemología tradicional ha sido frecuentemente considerada de una rama de la filosofía. La epistemología genética trabaja por afirmarse como una ciencia. Sus estudios reúnen datos y desarrollan teorías sobre el desarrollo del conocimiento, centrándose a veces en la evolución del conocimiento en la historia, a veces en la evolución del conocimiento en el individuo. Pero no supone que los dos campos sean autónomos: trata de comprender las relaciones entre ellos. Éstas pueden asumir distintas formas.

En el caso más simple el desarrollo individual es paralelo al desarrollo histórico, recordando la máxima de los biólogos, la ontogénesis recapitula la filogénesis. Por ejemplo, los niños representan uniformemente el mundo a la manera aristotélica pensando por ejemplo, que las fuerzas actúan sobre la posición y no sobre la velocidad. En otros casos, la relación es más compleja, en realidad hasta el punto de ser inversa. Las estructuras intelectuales que aparecen primero en el desarrollo infantil son a veces características no de la ciencia primitiva sino de la más moderna. Así, por ejemplo, la estructura madre topología aparece muy pronto en el desarrollo del niño, pero la topología misma surgió como subdisciplina matemática en la época moderna. Sólo cuando la matemática llega a ser suficientemente avanzada es capaz de descubrir sus propios orígenes.

En la primera parte del siglo veinte, la lógica formal era considerada sinónimo del basamento de la matemática. Solo cuando aparece la teoría estructuralista de Bourbaki vemos un desarrollo interno de la matemática que inaugura el camino hacia el "recuerdo" de sus raíces genéticas. Y a través del trabajo de la epistemología genética, esta "recordación" pone a la matemática en la más estrecha relación posible con el desarrollo de la investigación sobre como los niños construyen su propia realidad.

La epistemología genética ha llegado a enunciar un conjunto de homologías entre las estructuras del conocimiento y las de la mente que nacen para aprehender este conocimiento. Las estructuras madre de Bourbaki no son simplemente los elementos subyacentes al concepto de número; más bien, se descubren homologías en la mente a medida que construyen el número para sí misma. De tal manera, la importancia de estudiar la estructura del conocimiento

no radica solo en comprender mejor el conocimiento mismo, sino en comprender a la persona.

La investigación sobre la estructura de este proceso dialéctico se traduce en la convicción de que ni las personas ni el conocimiento – la matemática incluida – pueden ser plenamente aprehendidos aislados uno del otro, convicción elocuentemente expresada por Warren McCulloch a quien, junto con Norbert Wiener, debe atribuirse la fundación de la cibernética. Cuando se le preguntó, siendo joven, que interrogante orientaría su vida científica, McCulloch respondió: “¿Qué es el hombre, hecho de tal modo que puede comprender el número, y qué es el número hecho de tal modo que el hombre puede comprenderlo?”

Para McCulloch igual que para Piaget, el estudio de las personas y el estudio de lo que aprenden y piensan son inseparables. Tal vez paradójicamente para algunos, la investigación para la naturaleza de esta relación inseparable ha progresado mediante el estudio de las máquinas y el conocimiento que encarnan. Y es de esta metodología de investigación, la de la inteligencia artificial, que nos ocuparemos ahora.

En Inteligencia Artificial, los investigadores usan modelos computacionales para obtener una percepción profunda de la psicología humana así como para reflexionar sobre ésta como fuente de ideas para generar mecanismos que emulen la inteligencia humana. Esta empresa impresiona a muchos como algo ilógico: aun cuando el desempeño parezca idéntico, ¿hay alguna razón para pensar que los procesos subyacentes son los mismos? Otros la encuentran ilícita: tanto la teología como la mitología consideran que la frontera entre el hombre y la maquina es inmutable. Existe el temor de que deshumanicemos lo esencialmente humano al trazar analogías inadecuadas entre nuestros juicios y esos “cálculos” de computadora. Tomo con mucha seriedad estas objeciones, pero pienso que están basadas en una concepción de la inteligencia artificial mas reduccionista que cualquier cosa en la cual personalmente me interese. Una breve parábola y un razonamiento por analogía solo a medias humorístico expresaran mi propia opinión sobre el asunto.

A los hombres siempre les interesó volar. Una vez, hace mucho tiempo, los científicos se propusieron comprender como volaban los pájaros. Primero los observaron, en la esperanza de hallar una correlación entre el movimiento de las alas y el movimiento ascendente. Luego procedieron a experimentar y descubrieron que cuando a un pájaro se le arrancaban las plumas, ya no podía volar más. Habiendo determinado de esta manera que las plumas eran el órgano del vuelo, los científicos concentraron entonces sus esfuerzos en la investigación microscópica y ultramicroscópica de las plumas a fin de descubrir la naturaleza de su poder de vuelo.



En realidad nuestra actual comprensión del vuelo de los pájaros no provino de un estrecho estudio de estos y no obtuvo ningún beneficio del estudio de las plumas. Proviene más bien del estudio de fenómenos de diferentes clases y que exigieron metodologías distintas. Ciertas investigaciones involucraron estudios altamente matemáticos de las leyes de movimiento de los fluidos ideales. Otras investigaciones, más cercanas a nuestra idea central aquí, consistieron en la construcción de maquinas de "vuelo artificial". Y, por supuesto, debemos agregar a la lista la observación real del vuelo de los pájaros. Todas estas actividades de investigación dieron origen sinérgicamente a la ciencia aeronáutica a través de lo que comprendemos sobre el "vuelo natural" de los pájaros y el "vuelo artificial" de los aviones. Y es con un espíritu muy parecido que imagino las diversas investigaciones en matemática y en inteligencia de máquina actuando sinérgicamente con la psicología, para dar origen a una disciplina de la ciencia cognoscitiva cuyos principios se aplicarían a la inteligencia natural y a la artificial.

Es instructivo trasladar al contexto del vuelo las objeciones corrientemente planteadas contra la IA. Esto nos lleva a imaginar escépticos que dirían: "Ustedes los matemáticos manejan fluidos ideales, la atmósfera real es mucho más complicada", o "No tienen ninguna razón para suponer que los aviones y los pájaros funcionan de la misma manera: los pájaros no tienen hélices, los aviones no tienen plumas." Pero las premisas de estas críticas son verdaderas solo en el sentido más superficial: el mismo principio (por ej., la ley de Bernoulli) se aplica tanto a los fluidos reales como a los ideales, y se aplica tanto si el flujo fluye sobre una pluma como sobre un ala de aluminio.

Quienes trabajan en la rama "estudios cognoscitivos" de la IA no comparten una única manera de concebir el pensamiento, como tampoco lo hacen los psicólogos tradicionales. Algunos utilizan el modelo de la computadora para reducir todo el pensamiento a las operaciones formales de poderosos sistemas deductivos. Aristóteles logro formular las reglas deductivas para un pequeño rincón del pensamiento humanismo en silogismos tan simples como el que dice: "Si todos los hombres son mortales y Sócrates es un hombre, luego Sócrates es mortal." En el siglo XIX los matemáticos pudieron extender este tipo de razonamiento a un área más amplia pero todavía restringida. Pero sólo dentro del contexto de los métodos computacionales hubo un intento serio de extender la lógica deductiva a todas las formas del razonamiento, incluso el razonamiento del sentido común y el razonamiento por analogía. El trabajo con este tipo de

modelo deductivo era muy popular en las primeras épocas de la IA. En años recientes, sin embargo, muchos de los que trabajan en este campo han adoptado una estrategia casi diametralmente opuesta. En lugar de buscar poderosos métodos deductivos que permitieran sacar conclusiones sorprendentes a partir de principios generales, el nuevo enfoque supone que las personas son capaces de pensar solo porque pueden recurrir a reservas más amplias de conocimientos particulares específicos. Con más frecuencia de la que nos damos cuenta, resolvemos problemas porque ya “casi” sabemos la respuesta”. Algunos investigadores tratan de dotar de inteligencia a los programas mediante el recurso de suministrarles tal cantidad de conocimientos que la mayor parte de la resolución de un problema consiste solo en su recuperación desde algún lugar de la memoria.

Dados mis antecedentes como matemático y psicólogo piagetiano, naturalmente me interesé más en los tipos de modelo computacional que pudieran conducirme a una mejor reflexión sobre poderosos procesos evolutivos: la adquisición del pensamiento espacial y la capacidad de manejar el tamaño y la cantidad. Los enfoques antagónicos –basados en la deducción y el conocimiento- tendían a abordar el desempeño de un sistema intelectual dado cuya estructura, si no cuyo contenido, permanecía estática. El tipo de cuestiones evolutivas que me interesaban requería un modelo dinámico de la forma en que las estructuras intelectuales mismas pueden nacer y modificarse. Creo que este es el tipo de modelos más relevante para la educación.

El mejor modo que conozco de caracterizar este enfoque consiste en dar una muestra de una teoría notoriamente influida por las ideas provenientes de la computación, que puede ayudarnos a comprender un fenómeno psicológico específico: la conservación piagetiana. Recordamos que hasta la edad de seis o siete años los chicos creen que una cantidad de líquido puede aumentar o disminuir cuando se lo vierte de un recipiente a otro. Específicamente, cuando el segundo recipiente es más alto y más estrecho que el primero, los chicos afirman unánimemente que la cantidad de líquido ha aumentado. Y luego, como por arte de magia, aproximadamente a la misma edad, todos los chicos cambian de idea: ahora insisten, en forma igualmente inequívoca, que la cantidad de líquido permanece igual.

Se han propuesto muchas teorías para explicar cómo llega a suceder esto. Una de ellas, que puede ser la que suena más familiar pues recurre a categorías psicológicas tradicionales, atribuye la posición pre-conservacionista a que el niño está dominado por las “apariencias”. La “razón” del niño no puede prevalecer sobre el modo en que las cosas “parecen ser”. La percepción gobierna.

Vayamos ahora a otra teoría, esta vez inspirada en métodos computacionales. Planteamos nuevamente la pregunta: ¿por qué la altura de un recipiente angosto le parece al niño más cantidad, y como se modifica esto?

Supongamos la existencia de tres agentes en la mente del niño, cada uno de los cuales juzga las cantidades de un modo "simplista" diferente. El primero, A-altura, juzga la cantidad de los líquidos y de cualquier otra cosa por su extensión vertical. A-altura es un agente práctico en la vida del niño. Está acostumbrado a comparar niños poniéndolos espalda contra espalda y a igualar de coca-cola y de leche chocolatada en los vasos. Subrayamos que A-altura no hacen nada tan complicado como "percibir" la cantidad de líquido. En cambio, está fanáticamente dedicado a un principio abstracto: todo lo que llega más alto es más.

Hay un segundo agente. A-ancho, que juzga por la extensión horizontal. No tiene tanta utilización como A-altura. Tiene oportunidad de juzgar que en el mar hay mucha agua, pero en la mente del niño este principio es menos "influyente" que A-altura.

Por último, hay un agente llamado A-historia que dice que las cantidades son las mismas porque una vez lo eran. A-historia parece hablar como un niño conservacionista, pero esto es una ilusión. A-historia carece de comprensión y diría que la cantidad es la misma aunque en realidad se hubiera agregado algo.

En el experimento con el niño preconservacionista, cada uno de los tres agentes toma su propia "decisión" y reclama que se la adopte. Como ya sabemos, la voz de A-altura es la que habla más alto. Pero esto cambia cuando el niño pasa al siguiente estadio.

Dado nuestro supuesto de la presencia de los agentes, hay tres maneras en que puede tener lugar este cambio. A-altura y A-ancho podrían volverse más "sofisticados", de manera que, por ejemplo, A-altura se auto-descalificaría excepto cuando todos los demás factores son iguales. Esto significaría que A-altura se adelantaría para juzgar por su altura sólo aquellas cosas que tuvieran secciones transversales iguales. En segundo lugar, podría haber un cambio en la "jerarquía", en el predominio: A-historia podría convertirse en la voz dominante. Ninguna de estas dos modalidades de cambio es imposible. Pero hay una tercera modalidad que produce el mismo efecto de una manera más simple. Su idea clave es que A-altura y A-ancho se neutralizan recíprocamente al dar opiniones contradictorias. La idea es atractiva (y cercana al propio concepto de Piaget de composiciones agrupadas de operaciones) pero suscita algunos problemas. ¿Por qué no se neutralizan mutuamente todos los agentes de manera tal que el niño no tenga absolutamente ninguna opinión? La pregunta queda respondida por otro postulado (que tiene mucho en común con la idea de Pia-

get de que los operadores intelectuales se organizan en groupements). El principio de neutralización se torna operativo si se impone a los agentes A-altura y A-ancho una estructura suficiente para que se hallen en una relación especial el uno con el otro, pero no con A-historia. Hemos visto que la técnica de crear una entidad nueva funciona poderosamente en los sistemas de programación. Y éste es el proceso que postulamos aquí. Surge una nueva entidad, un nuevo agente. Se trata de A-geom que actúa como supervisor de A-altura y A-ancho. En los que casos en que A-altura y A-ancho concuerdan, A-geom transmite su mensaje con gran "autoridad". Pero si están en desacuerdo, A-geom resulta socavado y las voces de sus subordinados se neutralizan. Es necesario subrayar que no pretende decir que A-geom "comprende" las razones de la toma de decisiones efectuada por A-altura y A-ancho. A-geom no sabe nada excepto si están o no de acuerdo y, si lo están, en qué dirección.

Este modelo está absurdamente supersimplificado al sugerir que incluso un elemento tan simple del pensamiento del niño (tal como ésta conservación) puede ser entendido en términos de las interacciones de cuatro agentes. Se requieren docenas o centenas para dar cuenta de la complejidad del proceso real. Pero a pesar de su simplicidad, el modelo transmite con precisión algunos de los principios de la teoría: en particular que los componentes del sistema se parecen más a personas que a proposiciones y que sus interacciones se parecen más a interacciones sociales que a operaciones de lógica matemática. Este cambio de perspectiva nos permite resolver muchos problemas técnicos de la psicología evolutiva. En especial, podemos comprender el aprendizaje lógico como formando un continuo con el aprendizaje social y corporal.

He dicho que esta teoría se inspira en una metáfora computacional. Alguien podría preguntar de que manera. La "teoría" podría parecer nada más que una charla antropomórfica. Pero ya hemos visto que las descripciones antropomórficas son frecuentemente un paso hacia teorías computacionales. Y el vigor de la teoría de la "sociedad de la mente" reside en que los agentes pueden traducirse a modelos computacionales precisos. Mientras sólo pensemos a estos agentes como "personas", la teoría es circular. Explica la conducta de las personas en términos de la conducta de las personas. Pero, si concebimos los agentes como entidades computacionales bien definidas similares a los sub-procedimientos VE, LINEA y CABEZA dentro del procedimiento HOMBRE, todo se vuelve mas claro. Hemos visto incluso en programas pequeños como módulos muy simples pueden reunirse para producir resultados complejos.

Este argumento computacional salva a la teoría de la "sociedad de la mente" de la acusación de apoyarse en un círculo vicioso. Pero no la salva de ser circular: Por el contrario, al igual que los programas recursivos al estilo del procedimiento ESPIRAL del capítulo 3, la teoría deriva gran parte de su poder de la utiliza-

ción constructivista de la "lógica circular". Un lógico tradicional que observara como se definía ESPIRAL por referencia a ESPIRAL podría haber objetado, pero los programadores de computadoras y los epistemólogos genéticos comparten una concepción dentro de la cual este tipo de auto referencia no solo es legítima sino necesaria. Y ambos consideran que tiene un elemento paradójal que se capta sólo muy parcialmente al observar como los niños utilizan su lógica "inferior" para construir la lógica "superior" de la siguiente fase de su desarrollo. En grado creciente a lo largo de su extensa carrera Piaget ha enfatizado la importancia, para el desarrollo intelectual, de la capacidad de reflexionar sobre su propio pensamiento. La "paradoja matemática" reside en el hecho de que esta reflexión debe hacerse desde dentro del sistema actual del niño.

A pesar de su status súper simplificado, casi metafórico, la explicación de la conservación por los cuatro agentes captura un elemento de la paradoja. A un lógico matemático tal vez le gustaría imponerles A-altura y A-ancho un agente superior capaz de calcular o por lo menos de estimar, el volumen a partir de la altura y la sección transversal. A muchos educadores tal vez les gustaría imponer al niño tal fórmula. Pero esto sería introducir un elemento ajeno al sistema intelectual del niño pre-conservacionista. Nuestro A-geom pertenece firmemente al sistema del niño. Podría incluso derivarse del modelo de un padre que no tiene demasiado éxito en imponer orden en la familia. Es posible especular, si bien no tengo pruebas, con la emergencia de la conservación se relaciona con la crisis edípica del niño a través de la relevancia que otorga a este modelo. Siento que piso terreno más firme al conjeturar que algo como A-geom puede volverse importante porque posee tan fuertemente la relación bilateral utilizada para concebir la Tortuga: se relaciona a la vez con estructuras que se hallan firmemente establecidas, tales como la representación infantil de las figuras de autoridad, y con gérmenes de importantes ideas matemáticas, tales como la idea de "cancelación".

Los lectores familiarizados con los escritos técnicos de Piaget reconocerán este concepto germen como uno de los principios de sus "agrupamientos". Consideraran en consecuencia que nuestro modelo no se diferencia mucho del de Piaget. En un sentido fundamental tendrían razón. Pero se introduce un elemento nuevo al otorgar un papel especial a las estructuras computacionales: el tema de este libro ha sido el de explotar este papel especial dando a los niños acceso a las culturas computacionales. Si, y solo si, estas tienen la estructura apropiada, pueden acrecentar notablemente la capacidad infantil de representar las estructuras establecidas de maneras que movilizarán su potencial conceptual.

Para recapitular, nuestra interpretación de la teoría de Piaget logra tres cosas. Primero, ofrece una teoría psicológica específica, que puede muy bien competir, por su sobriedad y su poder explicativo, con otras de este campo. Segundo, nos

muestra el poder de un principio computacional específico, en este caso la teoría de los procedimientos puros, es decir, procedimientos que pueden cerrarse y utilizarse como módulos. Tercero, concretiza mi razonamiento sobre el modo en que los diferentes lenguajes son capaces de influir sobre las culturas que pueden crecer a su alrededor. No todos los lenguajes de programación encarnan esta teoría de los procedimientos puros. Cuando no lo hacen, su papel como metáforas de cuestiones psicológicas resulta severamente afectado. La analogía entre la inteligencia artificial y el vuelo artificial demostró el punto de que en los fenómenos artificiales y naturales pueden encontrarse los mismos principios subyacentes, no importa cuán diferentes puedan parecer tales fenómenos. La dinámica de la elevación es fundamental para el vuelo como tal, ya sea que el sujeto que vuela sea de carne y hueso o de metal. Acabamos de ver un principio que puede ser fundamental tanto para la inteligencia humana como para la artificial: el principio de la modularidad epistemológica. Ha habido muchas discusiones sobre si la máquina ideal para el logro de la inteligencia habría de ser analógica o digital, y si sobre el cerebro es analógico o digital. Desde el punto de vista de la teoría que propongo aquí, estas discusiones no hacen al caso. La cuestión importante no es si el cerebro o la computadora son discretos sino si el conocimiento es modularizable.

Para mí, nuestra capacidad de usar metáforas computacionales de este modo, como portadoras de nuevas teorías psicológicas tiene consecuencias respecto de adonde van las teorías del conocimiento y adónde vamos nosotros como productores y portadores del conocimiento. Estas áreas no son independientes. En capítulos anteriores se sugirió que el modo en que pensamos sobre el conocimiento afecta el modo en que pensamos sobre nosotros mismos. En particular, nuestra imagen del conocimiento como dividido en clases diferentes nos conduce a una concepción de las personas divididas según cuáles son sus aptitudes. Esto lleva a su vez a una balcanización de nuestra cultura.

Quizás el hecho de que he hablado en forma tan negativa sobre la balcanización de nuestra cultura y tan positiva sobre la modularización del conocimiento requiere cierta clarificación. Cuando el conocimiento se puede descomponer en "porciones a la medida de la mente", es más comunicable, más asimilable, más simplemente construible. El hecho de que dividamos el conocimiento en mundos científicos y humanísticos define a ciertos conocimientos como a priori incommunicables a ciertas clases de personas. Nuestro compromiso con la comunicación no solo se expresa a través de nuestro compromiso con la modularización, que la facilita, sino a través de nuestro intento de encontrar un lenguaje para dominios tales como el de la física y el de la matemática, que tienen como esencia la comunicación entre entidades construidas. Al reformular las leyes de Newton como enunciados sobre como las partículas (o Tortugas newtonianas)

se comunican entre sí, les damos un asidero que tanto el niño como el poeta pueden tomar más fácilmente.

Consideremos otro ejemplo del modo en que nuestras imágenes del conocimiento pueden subvertir nuestro sentido de nosotros mismos como agentes intelectuales. Los educadores sostienen a veces un ideal de conocimiento dotado del tipo de coherencia definida por la lógica formal. Pero estos ideales tienen escasa semejanza con la experiencia que de sí mismas tienen la mayoría de las personas. La experiencia subjetiva de conocimiento es más similar al caos y a la controversia de agentes en competencia que a la certidumbre y el orden de pes que implican *quis*. La discrepancia entre nuestra experiencia de nosotros mismos y nuestras idealizaciones del conocimiento tiene efecto: nos intimida, disminuye el sentido de nuestra propia capacidad, y nos conduce a estrategias contraproducentes para aprender y pensar.

Muchos estudiantes de mayor edad han sido intimidados hasta el punto de abandonar, y lo que es cierto para los adultos es doblemente cierto para los niños. Ya hemos visto que, a pesar de su experiencia de sí mismos como constructores de teorías, los niños no son respetados como tales. Y estas contradicciones se complican por la insistencia en un ideal del conocimiento al que no se ajusta el pensamiento de nadie. Muchos niños y estudiantes universitarios que resuelven “nunca podre ser matemático o científico”, están reflejando la discrepancia entre el modo en que han sido llevados a creer que debe pensar el matemático y el modo en que ellos lo hacen. En realidad la verdad es otra: su propio pensamiento se parece mucho más al del matemático que lo que cualquiera de los dos se parece al ideal lógico.

He hablado de la importancia de las ideas poderosas para aprehender el mundo. Pero difícilmente podríamos aprender nunca una idea nueva si cada vez que lo hiciéramos tuviéramos que reorganizar totalmente nuestras estructuras cognitivas a fin de utilizarla o incluso si tuviéramos que asegurarnos de que no se introdujese ninguna incoherencia. Si bien las ideas poderosas tienen la capacidad de ayudarnos a organizar nuestra manera de pensar sobre una determinada clase de problemas (tal como los problemas de física), no necesitamos reorganizarnos para poder utilizarlas. Ponemos nuestras habilidades y estrategias heurísticas en una especie de caja de herramientas y, aunque su interacción puede, con el transcurso del tiempo, dar origen a cambios globales, el acto de aprendizaje es en sí mismo un suceso localizado.

La naturaleza localizada del conocimiento aparece en mi descripción de la adquisición de la idea de conservación. Los agentes necesarios ingresaron al sistema en forma localizada; sus metas generales estaban en recíproca contradicción; el agente que finalmente las reconcilia los deja en su lugar. No hay razón alguna para que esta “teoría del remiendo” sobre la construcción de teorías de-

ba considerarse adecuada solo para describir el aprendizaje infantil. La investigación sobre inteligencia artificial nos está dando gradualmente una idea más segura de la gama de problemas que pueden resolverse con sentido sobre la base del modelo que hemos esbozado para el problema de la conservación: con agentes modulares, cada uno simplista a su manera, muchos de ellos en conflicto entre sí. Los conflictos se regulan y se mantienen bajo control, antes que "resolverse", a través de la intervención de agentes especiales no menos simplistas que los originales. Su manera de conciliar las diferencias no involucra el forzar el sistema dentro de un molde lógicamente coherente.

El proceso recuerda el de jugar con algo nuevo a fin de familiarizarse con ello; el aprendizaje consiste en armar un conjunto de materiales y herramientas que uno puede manejar y manipular. Tal vez, yendo a la esencia del asunto, se trate de un proceso de trabajar con lo que uno tiene. Todos estamos familiarizados con este proceso en el nivel consciente, por ejemplo, cuando abordamos un problema empíricamente, probando todas las cosas que alguna vez supimos que dieron resultado antes en problemas similares. Pero aquí sugiero que el trabajar con lo que uno tiene es una forma abreviada de procesos de aprendizajes más profundos, incluso inconscientes. El antropólogo Claude Lévi-Strauss ha hablado en términos semejantes de la clase de construcción de teorías que caracteriza a la ciencia primitiva. Esta es una ciencia de lo concreto, donde las relaciones entre los objetos naturales en todas sus combinaciones y recombina- ciones suministran un vocabulario conceptual para la construcción de teorías científicas. Lo que estoy sugiriendo aquí es que en el sentido más fundamental todos, como sujetos de aprendizaje, somos bricoleurs. Esto nos conduce al segundo tipo de consecuencia de nuestra teoría computacional de los agentes. Si las primeras consecuencias tenían que ver con el impacto sobre nuestras ideas acerca del conocimiento y el aprendizaje, las segundas tienen que ver con el posible impacto sobre nuestra imagen de nosotros mismos como sujetos del aprendizaje. Si el bricolage es un modelo del modo en que se construyen teorías científicamente legítimas, entonces podemos comenzar a desarrollar un mayor respeto por nosotros mismos como bricoleurs. Y por supuesto esto se une con nuestro tema central de la importancia y el poder del aprendizaje piagetiano. A fin de crear las condiciones para traer al campo piagetiano lo que ahora es aprendizaje no piagetiano, debemos ser capaces de actuar de buena fe. Debemos sentir que no estamos desnaturalizando el conocimiento en el proceso.

Concluiré este capítulo sobre la teoría cognoscitiva y las personas con una conjetura. Anteriormente dije que no habría de presentar a Piaget como un teórico de los estadios. Pero la reflexión sobre los estadios piagetianos suministra un contexto para demostrar un punto importante acerca de un posible impacto de una cultura computacional sobre la gente. Piaget ve sus estadios del desarrollo



cognoscitivo como invariables, y numerosas investigaciones interculturales parecen confirmar la validez de su opinión. En una sociedad tras otra, los niños parecen desarrollar las capacidades cognoscitivas en el mismo orden. En particular, su estadio de las operaciones concretas, al que pertenecen típicamente las conservaciones, comienza cuatro o más años antes que el siguiente y último estadio, el de las operaciones formales. La construcción de un estadio de operaciones concretas está respaldada por la observación de que, típicamente, los niños de nuestra sociedad a los seis o siete años logran un avance en muchos terrenos, y aparentemente en todos a la vez. Son capaces de utilizar unidades de cantidad, espacio y tiempo; de razonar por transitividad; de construir sistemas clasificatorios. Pero hay cosas que no pueden hacer. En particular, tropiezan en situaciones que exigen pensar no sobre cómo son las cosas sino sobre todas las maneras en que podrían ser. Consideremos el siguiente ejemplo, que ya he anticipado en la introducción.

Se entrega a un niño una colección de cuentas de diferentes colores, digamos verde, rojo, azul y negro, y se le pide que forme todos los pares posibles de colores: verde-azul, verde-rojo, verde-negro. Así como no adquieren la idea de conservación hasta su séptimo año de vida, los niños de todo el mundo son incapaces de realizar tareas combinatorias antes de tener once o doce años. De hecho, muchos adultos que son lo suficientemente "inteligentes" como para llevar una vida normal no adquieren nunca esta habilidad.

¿Cuál es la naturaleza de la diferencia entre las operaciones así llamadas "concretas" involucradas en la idea de conservación y las así llamadas "formales" involucradas en la tarea combinatoria? Los nombres que les otorgó Piaget y los datos empíricos sugieren una diferencia profunda y esencial. Pero la observación del problema a través del prisma de las ideas desarrolladas aquí, produce una impresión muy diferente.

Desde un punto de vista computacional, los ingredientes más destacados de la tarea combinatoria se relacionan con la idea de procedimiento: sistematicidad y depuración. Una solución exitosa consistiría en seguir un procedimiento como el siguiente:

1. Separar las cuentas según sus colores.
2. Elegir un color A como el color 1.
3. Formar todos los pares que pueden formarse con el color 1.
4. Elegir el color 2.
5. Formar todos los pares que pueden formarse con el color 2.
6. Hacer lo mismo para cada color.
7. Volver y eliminar los duplicados.

De manera que de lo que realmente se trata de escribir y ejecutar un programa que incluya el paso fundamental de la depuración. Esta observación sugiere una razón para explicar el hecho de que los niños adquieran tan tarde esta habilidad: la cultura contemporánea ofrece oportunidades relativamente escasas de bricolaje con los elementos de procedimientos sistemáticos de este tipo. No quiero decir que tales oportunidades no existen. Algunas se encuentran; por ejemplo, en juegos donde un niño pueda crear sus propios "microcosmos combinatorios". Pero las oportunidades, los incentivos y la ayuda que se ofrecen al niño en esta área son significativamente menores que en áreas tales como el número. En nuestra cultura el número está abundantemente representado, el procedimiento sistemático lo está mediocrementemente.

No veo ningún motivo para dudar de que esta diferencia podría explicar la brecha de cinco años o más que existe entre las edades en que se adquieren la idea de conservación de la cantidad y las habilidades combinatorias, respectivamente.

La metodología corriente para investigar hipótesis como esta es la comparación de niños de diferentes culturas. Esto se ha hecho, por supuesto, para los estadios piagetianos. A niños de todos los niveles de desarrollo que los antropólogos han sido capaces de distinguir, y en más de cien sociedades diferentes, se les ha pedido que viertan líquidos y que clasifiquen cuentas. En todos los casos, si es que aparecía la idea de conservación y la capacidad combinatoria, la idea de conservación de la cantidad se evidenciaba en niños cinco o más años más pequeños que los que demostraban capacidad combinatoria. Sin embargo esta observación no arroja dudas sobre mi hipótesis. Bien puede ser universalmente cierto para las sociedades precomputacionales que el conocimiento numérico está representado más ricamente que el conocimiento de programación. No es difícil inventar explicaciones plausibles para dicho universal socio-cognoscitivo. Pero las cosas pueden ser diferentes en las computacionalmente ricas culturas del mañana. Si las computadoras y la programación se vuelven parte de la vida diaria de los niños, la brecha de conservación combinatoria seguramente se cerrará y podría llegar a invertirse: los niños pueden aprender a ser sistemáticos antes de aprender a ser cuantitativos!