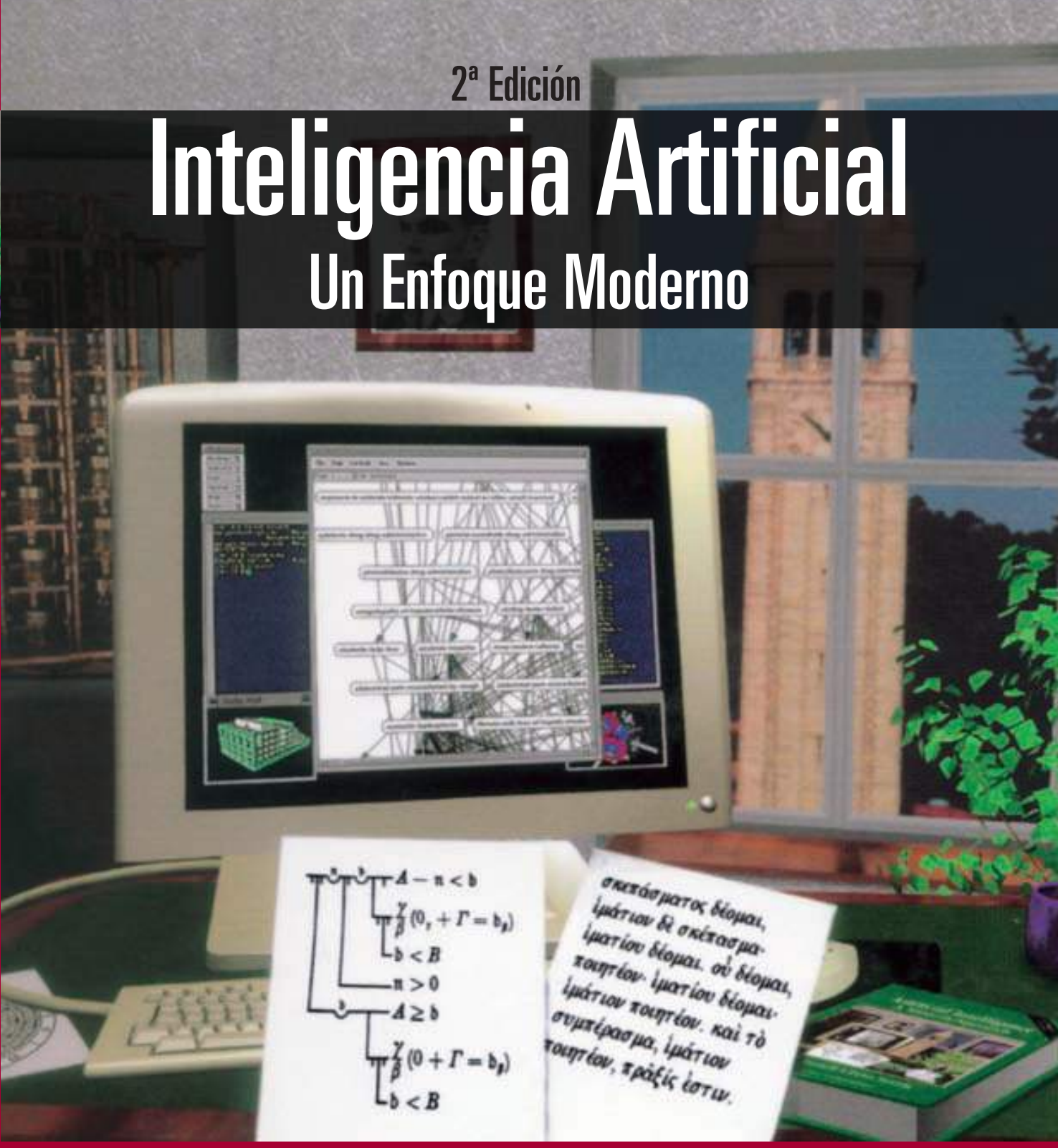
2ª Edición

Inteligencia Artificial

Un Enfoque Moderno



PEARSON
Prentice Hall

Stuart Russell
Peter Norvig

INTELIGENCIA ARTIFICIAL
UN ENFOQUE MODERNO

Segunda edición

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

UN ENFOQUE MODERNO

Segunda edición

Stuart J. Russell y Peter Norvig

Traducción:

Juan Manuel Corchado Rodríguez
Facultad de Ciencias
Universidad de Salamanca

Fernando Martín Rubio, José Manuel Cadenas Figueredo, Luis Daniel Hernández Molinero y Enrique Paniagua Arís
Facultad de Informática
Universidad de Murcia

Raquel Fuentetaja Pinzán y Mónica Robledo de los Santos
Universidad Pontificia de Salamanca, campus Madrid

Ramón Rizo Aldeguer
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Alicante

Revisión técnica:

Juan Manuel Corchado Rodríguez
Facultad de Ciencias
Universidad de Salamanca

Fernando Martín Rubio
Facultad de Informática
Universidad de Murcia

Andrés Castillo Sanz y María Luisa Díez Plata
Facultad de Informática
Universidad Pontificia de Salamanca, campus Madrid

Coordinación general de la traducción y revisión técnica:

Luis Joyanes Aguilar
Facultad de Informática
Universidad Pontificia de Salamanca, campus Madrid

Madrid • México • Santafé de Bogotá • Buenos Aires • Caracas • Lima
Montevideo • San Juan • San José • Santiago • São Paulo • White Plains

Datos de catalogación bibliográfica

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL. UN ENFOQUE MODERNO
Segunda edición

PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid, 2004

ISBN: 978-84-205-4003-0
Materia: Informática 681.3

Formato 195 × 250 Páginas: 1240

INTELIGENCIA ARTIFICIAL. UN ENFOQUE MODERNO. Segunda edición
RUSSELL, S. J.; NORVIG, P.

ISBN: 978-84-205-4003-0
Depósito Legal: M-14511-2008
Última reimpresión: 2008

PEARSON PRENTICE HALL es un sello editorial autorizado de PEARSON EDUCACIÓN, S.A.

Authorized translation from the English language edition, entitled *ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A MODERN APPROACH*, 2nd edition by RUSSELL, STUART; NORVIG, PETER.
Published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall.

ISBN: 0-13-790395-2

Equipo editorial:
Editor: David Fayerman Aragón
Técnico editorial: Ana Isabel García Borro

Equipo de producción:
Director: José Antonio Clares
Técnico: José Antonio Hernán

Diseño de cubierta: Equipo de diseño de PEARSON EDUCACIÓN, S.A.

Composición: COPIBOOK, S.L.

Impreso por:

IMPRESO EN MÉXICO - PRINTED IN MEXICO

Contenido

Prólogo

La Inteligencia Artificial (IA) es un campo grande (enorme), y este libro también. He intentado explorarlo con plena profundidad acompañándolo constantemente de lógica, probabilidad y matemáticas; de percepción, razonamiento, aprendizaje y acción, es decir, de todo lo que procede de los dispositivos microelectrónicos hasta los exploradores del planetario de la robótica. Otra razón para que este libro se pueda considerar espléndido es la profundidad en la presentación de los resultados, aunque nos hayamos esforzado por abarcar sólo las ideas más centrales en la parte principal de cada capítulo. En las notas bibliográficas al final de cada capítulo se proporcionan consejos para promover resultados.

El subtítulo de este libro es «Un Enfoque Moderno». La intención de esta frase bastante vacía es el hecho de que hemos intentado sintetizar lo que se conoce ahora dentro de un marco de trabajo común, en vez de intentar explicar cada uno de los subcampos de la IA dentro de su propio contexto histórico. Nos disculpamos ante aquellos cuyos subcampos son, como resultado, menos reconocibles de lo que podrían haber sido de cualquier otra forma.

El principal tema unificador es la idea del **agente inteligente**. Definimos la IA como el estudio de los agentes que reciben percepciones del entorno y llevan a cabo las acciones. Cada agente implementa una función la cual estructura las secuencias de las percepciones en acciones; también tratamos las diferentes formas de representar estas funciones, tales como sistemas de producción, agentes reactivos, planificadores condicionales en tiempo real, redes neurales y sistemas teóricos para las decisiones. Explicaremos el papel del aprendizaje cuando alcanza al diseñador y cómo se introduce en entornos desconocidos, mostrando también cómo ese papel limita el diseño del agente, favoreciendo así la representación y el razonamiento explícitos del conocimiento. Trataremos la robótica y su visión no como problemas con una definición independiente, sino como algo que ocurre para lograr los objetivos. Daremos importancia al entorno de las tareas al determinar el diseño apropiado de los agentes.

Nuestro objetivo principal es el de transmitir las *ideas* que han surgido durante los últimos 50 años de investigación en IA y trabajos afines durante los dos últimos milenios. Hemos intentado evitar una excesiva formalidad en la presentación de estas ideas a la vez que hemos intentado cuidar la precisión. Siempre que es necesario y adecuado, incluimos algoritmos en pseudo código para concretar las ideas, lo que se describe en el Apéndice B. Las implementaciones en varios lenguajes de programación están disponibles en el sitio Web de este libro, en la dirección de Internet **aima.cs.berkeley.edu**.

Este libro se ha pensado principalmente para utilizarse en un curso de diplomatura o en una serie de varios cursos. También se puede utilizar en un curso de licenciatura (quizás acompañado de algunas de las fuentes primarias, como las que se sugieren en las notas bibliográficas). Debida a la extensa cobertura y a la gran cantidad de algoritmos detallados, también es una herramienta útil como manual de referencia primario para alumnos de licenciatura superior y profesionales que deseen abarcar más allá de su propio subcampo. El único prerrequisito es familiarizarse con los conceptos básicos de la ciencia de la informática (algoritmos, estructuras de datos, complejidad) a un nivel de aprendizaje de segundo año. El cálculo de Freshman es útil para entender las redes neurales y el aprendizaje estadístico en detalle. En el Apéndice A se ofrecen los fundamentos matemáticos necesarios.

Visión general del libro

El libro se divide en ocho partes. La Parte I, **Inteligencia Artificial**, ofrece una visión de la empresa de IA basado en la idea de los agentes inteligentes, sistemas que pueden decidir qué hacer y entonces actutar. La Parte II, **Resolución de Problemas**, se concentra en los métodos para decidir qué hacer cuando se planean varios pasos con antelación, por ejemplo, navegar para cruzar un país o jugar al ajedrez. La Parte III, **Conocimiento y Razonamiento**, abarca las formas de representar el conocimiento sobre el mundo, es decir, cómo funciona, qué aspecto tiene actualmente y cómo podría actuar, y estudia también cómo razonar de forma lógica con ese conocimiento. La Parte IV, **Planificación**, abarca cómo utilizar esos métodos de razonamiento para decidir qué hacer, particularmente construyendo *planes*. La Parte V, **Conocimiento y Razonamiento Inciertos**, se asemeja a las Partes III y IV, pero se concentra en el razonamiento y en la toma de decisiones en presencia de la *incertidumbre* del mundo, la forma en que se podría enfrentar, por ejemplo, a un sistema de tratamiento y diagnosis médicos.

Las Partes II y V describen esa parte del agente inteligente responsable de alcanzar las decisiones. La Parte IV, **Aprendizaje**, describe los métodos para generar el conocimiento requerido por los componentes de la toma de decisiones. La Parte VII, **Comunicación, Percepción y Actuación**, describe las formas en que un agente inteligente puede percibir su entorno para saber lo que está ocurriendo, tanto si es mediante la visión, el tacto, el oído o el entendimiento del idioma; también describe cómo se pueden transformar los planes en acciones reales, o bien en movimientos de un robot, o bien en órdenes del lenguaje natural. Finalmente, la Parte VIII, **Conclusiones**, analiza el pasado y el futuro de la IA y sus repercusiones filosóficas y éticas.

Cambios de la primera edición

Desde que en 1995 se publicó la primera edición, la IA ha sufrido muchos cambios, por lo tanto esta edición también ha sufrido muchos cambios. Se han vuelto a escribir todos los capítulos elocuentemente para reflejar los últimos trabajos de este campo, reinterpretar los trabajos anteriores para que haya mayor coherencia con los actuales y mejorar la dirección pedagógica de las ideas. Los seguidores de la IA deberían estar alentados, ya que las técnicas actuales son mucho más prácticas que las del año 1995; por ejemplo, los algoritmos de planificación de la primera edición podrían generar planes sólo de unos cuantos pasos, mientras que los algoritmos de esta edición superan los miles de pasos. En la deducción probalística se han visto mejoras similares de órdenes de magnitud, procesamiento de lenguajes y otros subcampos. A continuación se muestran los cambios más destacables de esta edición:

- En la Parte I hacemos un reconocimiento de las contribuciones históricas a la teoría de controles, teoría de juegos, economía y neurociencia. Esto ayudará a sintonizar con una cobertura más integrada de estas ideas en los siguientes capítulos.
- En la Parte II se estudian los algoritmos de búsqueda en línea, y se ha añadido un capítulo nuevo sobre la satisfacción de las limitaciones. Este último proporciona una conexión natural con el material sobre la lógica.
- En la Parte III la lógica proposicional, que en la primera edición, se presentó como un peldaño a la lógica de primer orden, ahora se presenta como un lenguaje de representación útil por propio derecho, con rápidos algoritmos de deducción y diseños de agentes basados en circuitos. Los capítulos sobre la lógica de primer orden se han reorganizado para presentar el material de forma más clara, añadiendo el ejemplo del dominio de compras en Internet.
- En la Parte IV incluimos los métodos de planificación más actuales, tales como GRAPHPLAN y la planificación basada en la *satisfabilidad*, e incrementamos la cobertura de la planificación temporal, planificación condicional, planificación jerárquica y planificación multiagente.
- En la Parte V hemos aumentado el material de redes Bayesianas con algoritmos nuevos, tales como la eliminación de variables y el algoritmo Monte Carlo de cadena Markov; también hemos creado un capítulo nuevo sobre el razonamiento temporal incierto, abarcando los modelos ocultos de Markov, los filtros Kalman y las redes dinámicas Bayesianas. Los procesos de decisión de Markov se estudian en profundidad, añadiendo también secciones de teoría de juegos y diseños de mecanismos.
- En la Parte VI combinamos trabajos de aprendizaje estadístico, simbólico y neural, y añadimos secciones para impulsar los algoritmos, el algoritmo EM, aprendizaje basado en instancias, y métodos kernel «de núcleo» (soporte a máquinas vectoriales).
- En la Parte VII el estudio del procesamiento de lenguajes añade secciones sobre el procesamiento del discurso y la inducción gramatical, así como un capítulo so-

bre los modelos de lenguaje probalístico, con aplicaciones en la recuperación de información y en la traducción automática. El estudio de la robótica enfatiza la integración de datos inciertos de sensores, y el capítulo sobre la visión actualiza el material sobre el reconocimiento de objetos.
- En la Parte VIII introducimos una sección sobre las repercusiones éticas de la IA.

Utilización del libro

27 capítulos componen la totalidad del libro, que a su vez están compuestos por sesiones para clases que pueden durar una semana, por tanto para completar el libro se pueden necesitar hasta dos semestres. Alternativamente, se puede adaptar un curso de forma que se adecue a los intereses del instructor o del alumno. Si se utiliza el libro completo, servirá como soporte para cursos tanto si son reducidos, de introducción, para diplomaturas o para licenciados e ingenieros, de especialización, en temas avanzados. En la página Web aima.cs.berkeley.edu, se ofrecen programas de muestra recopilados de más de 600 escuelas y facultades, además de sugerencias que ayudarán a encontrar la secuencia más adecuada para sus necesidades.

Se han incluido 385 ejercicios que requieren una buena programación, y se han marcado con el icono de un teclado. Estos ejercicios se pueden resolver utilizando el repositorio de códigos que se encuentra en la página Web, aima.cs.berkeley.edu. Algunos de ellos son tan grandes que se pueden considerar proyectos de fin de trimestre. Algunos ejercicios requieren consultar otros libros de texto para investigar y se han marcado con el icono de un libro.

Los puntos importantes también se han marcado con un icono que indica puntos importantes. Hemos incluido un índice extenso de 10.000 elementos que facilitan la utilización del libro. Además, siempre que aparece un **término nuevo**, también se destaca en el margen.

TÉRMINO NUEVO

Utilización de la página Web

En la página Web se puede encontrar:

- implementaciones de los algoritmos del libro en diferentes lenguajes de programación,
- una relación de aproximadamente 600 universidades y centros, que han utilizado este libro, muchos de ellos con enlaces a los materiales de cursos en la red,
- una relación de unos 800 enlaces a sitios Web con contenido útil sobre la IA,
- una lista de todos los capítulos, uno a uno, material y enlaces complementarios,
- instrucciones sobre cómo unirse a un grupo de debate sobre el libro,
- instrucciones sobre cómo contactar con los autores mediante preguntas y comentarios,

- instrucciones sobre cómo informar de los errores del libro, en el caso probable de que existieran, y
- copias de las figuras del libro, junto con diapositivas y otro tipo de material para profesores.

Agradecimientos

Jitendra Malik ha escrito la mayor parte del Capítulo 24 (sobre la visión). Gran parte del Capítulo 25 (sobre robótica) de esta edición ha sido escrita por Sebastián Thrun, mientras que la primera edición fue escrita por John Canny. Doug Edwards investigó las notas históricas de la primera edición. Tim Huang, Mark Paskin y Cinthia Bruyns ayudó a realizar el formato de los diagramas y algoritmos. Alan Apt, Sondra Chavez, Toni Holm, Jake Warde, Irwin Zucker y Camille Trentacoste de Prentice Hall hicieron todo lo que pudieron para cumplir con el tiempo de desarrollo y aportaron muchas sugerencias sobre el diseño y el contenido del libro.

Stuart quiere agradecer a sus padres el continuo apoyo y aliento demostrado, y a su esposa, Loy Sheflott su gran paciencia e infinita sabiduría. También desea que Gordon y Lucy puedan leer esta obra muy pronto. Y a RUGS (Russell`s Unusual Group of Students) por haber sido de verdad de gran ayuda.

Peter quiere agradecer a sus padres (Torsten y Gerda) el ánimo que le aportaron para impulsarle a empezar el proyecto, y a su mujer Kris, hijos y amigos por animarle y tolerar todas las horas que ha dedicado en escribir y en volver a escribir su trabajo.

Estamos en deuda con los bibliotecarios de las universidades de Berkeley, Stanford, y con el MIT y la NASA; y con los desarrolladores de CiteSeer y Google por haber revolucionado la forma en que hemos realizado gran parte de la investigación.

Obviamente, nos es imposible agradecer a todas las personas que han utilizado el libro y que han realizado sugerencias, sin embargo nos gustaría mostrar especial agradecimiento a los comentarios que han realizado personas como Eyal Amir, Krzysztof Apt, Ellery Aziel, Jeff Van Baalen, Brian Baker, Don Barker, Tony Barrett, James Newton Bass, Don Beal, Howard Beck, Wolfgang Bibel, John Binder, Larry Bookman, David R. Boxall, Gerhard Brewka, Selmer Bringsjord, Carla Brodley, Chris Brown, Wilhelm Burger, Lauren Burka, Joao Cachopo, Murray Campbell, Norman Carver, Emmanuel Castro, Anil Chakravarthy, Dan Chisarick, Roberto Cipolla, David Cohen, James Coleman, Julie Ann Comparini, Gary Cottrell, Ernest Davis, Rina Dechter, Tom Dietterich, Chuck Dyer, Barbara Engelhardt, Doug Edwards, Kutluhan Erol, Oren Etzioni, Hana Filip, Douglas Fisher, Jeffrey Forbes, Ken Ford, John Fosler, Alex Franz, Bob Futrelle, Marek Galecki, Stefan Gerberding, Stuart Gill, Sabine Glesner, Seth Golub, Gosta Grahne, Russ Greiner, Eric Grimson, Barbara Grosz, Larry Hall, Steve Hanks, Othar Hansson, Ernst Heinz, Jim Hendler, Christoph Herrmann, Vasant Honavar, Tim Huang, Seth Hutchinson, Joost Jacob, Magnus Johansson, Dan Jurafsky, Leslie Kaelbling, Keiji Kanazawa, Surekha Kasibhatla, Simon Kasif, Henry Kautz, Gernot Kerschbaumer, Richard Kirby, Kevin Knight, Sven Koenig, Daphne Koller, Rich Korf, James Kurien, John Lafferty, Gus Larsson, John Lazzaro, Jon LeBlanc, Jason Leatherman, Frank Lee,

Edward Lim, Pierre Louveaux, Don Loveland, Sridhar Mahadevan, Jim Martin, Andy Mayer, David McGrane, Jay Mendelsohn, Brian Milch, Steve Minton, Vibhu Mittal, Leora Morgenstern, Stephen Muggleton, Kevin Murphy, Ron Musick, Sung Myaeng, Lee Naish, Pandu Nayak, Bernhard Nebel, Stuart Nelson, XuanLong Nguyen, Illah Nourbakhsh, Steve Omohundro, David Page, David Palmer, David Parkes, Ron Parr, Mark Paskin, Tony Passera, Michael Pazzani, Wim Pijls, Ira Pohl, Martha Pollack, David Poole, Bruce Porter, Malcolm Pradhan, Bill Pringle, Lorraine Prior, Greg Provan, William Rapaport, Philip Resnik, Francesca Rossi, Jonathan Schaeffer, Richard Scherl, Lars Schuster, Soheil Shams, Stuart Shapiro, Jude Shavlik, Satinder Singh, Daniel Sleator, David Smith, Bryan So, Robert Sproull, Lynn Stein, Larry Stephens, Andreas Stolcke, Paul Stradling, Devika Subramanian, Rich Sutton, Jonathan Tash, Austin Tate, Michael Thielscher, William Thompson, Sebastian Thrun, Eric Tiedemann, Mark Torrance, Randall Upham, Paul Utgoff, Peter van Beek, Hal Varian, Sunil Vemuri, Jim Waldo, Bonnie Webber, Dan Weld, Michael Wellman, Michael Dean White, Kamin Whitehouse, Brian Williams, David Wolfe, Bill Woods, Alden Wright, Richard Yen, Weixiong Zhang, Shlomo Zilberstein, y los revisores anónimos proporcionados por Prentice Hall.

Acerca de la portada

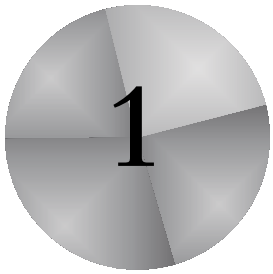
La ilustración de la portada ha sido diseñada por los autores y ejecutada por Lisa Marie Sardegna y Maryann Simmons utilizando SGI Inventor™ y Photshop™ de Adobe, y representa los siguientes elementos de la historia de la IA:

1. El algoritmo de planificación del *De Motu Animalium*, Aristóteles (400 a.C.).
2. El generador de conceptos del *Ars Magna* de Ramón Lull (1300 d.C.).
3. El motor de diferencias de Charles Babbage, un prototipo del primer computador universal (1848).
4. La notación de lógica de primer orden de Gottlob Frege (1789).
5. Los diagramas del razonamiento lógico de Lewis Carroll (1886).
6. La notación de redes probalísticas de Sewall Wright (1921).
7. Alan Turing (1912-1954).
8. El Robot Shakey (1969-1973).
9. Un sistema experto de diagnóstico actual (1993).

Sobre los autores

Stuart Russell nació en 1962 en Portsmouth, Inglaterra. En 1982, obtuvo su B.A. en Física formando parte de los primeros en el cuadro de honor de la Universidad de Oxford. En 1986 obtuvo el Ph. D. en Informática por la Universidad de Stanford. Más tarde empezó a trabajar en la Universidad de California, Berkeley, en donde es profesor de Informática, director del centro de Sistemas Inteligentes y colaborador del Smith-Zadeh en Ingeniería. En 1990, recibió el premio Presidential Young Investigator Award de la National Sciencie Foundation (Fundación Nacional de las Ciencias), y en 1995 obtuvo el premio compartido en el Computers y Thought Award. En 1996 se convirtió en Millar Profesor de la University of California, y en el año 2000 fue nombrado rector de la universidad. En 1998, dio la lectura inaugural de la Stanford University, Forsythe Memorial Lectures. Forma parte como «Fellow», y es uno de los primeros miembros del Executive Council de la American Association for Artificical Intelligence. Ha publicado un gran número de trabajos, más de 100 sobre una gran variedad de temas en inteligencia artificial. Y es autor de otros dos libros: *The Use of Knowledge in Analogy and Induction*, y (con Erik Wefald) *Do the Right Thing: Studies in Limited Rationality*.

Peter Norvig es director de Search Quality de Google, Inc. y forma parte, como «Fellow» y miembro del Executive Council en la American Association for Artificial Intelligence. Anteriormente, fue director de la División de Ciencias Computacionales del Ames Research Center de la NASA, en donde supervisaba la investigación y el desarrollo en inteligencia artificial. Antes de eso, trabajó como director de ciencia en Junglee, donde ayudó a desarrollar uno de los primeros servicios de extracción de información en Internet, y trabajó también como científico senior en Sun Microsystems Laboratories, cuyo trabajo consistía en recuperar información inteligente. Recibió un B.S. en Matemáticas Aplicadas por la Brown University, y un Ph. D. en informática por la Universidad de California en Berkeley. Es profesor de la University of Southern California, y miembro de la facultad de investigación en Berkeley. Tiene en su haber más de 50 publicaciones en Informática entre las que se incluyen los libros: *Paradigms of AI Programming: Case Studies in Common Lisp, Verbmobil: A Translation System for Face-to-Face Dialog*, e *Intelligent Help Systems for UNIX*.



1 Introducción

Donde se intentará explicar por qué se considera a la inteligencia artificial un tema digno de estudio y donde se intentará definirla con exactitud; es esta tarea muy recomendable antes de emprender de lleno su estudio.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los hombres se han denominado a sí mismos como *Homo sapiens* (hombre sabio) porque nuestras capacidades mentales son muy importantes para nosotros. Durante miles de años, hemos tratado de entender *cómo pensamos*; es decir, entender cómo un simple puñado de materia puede percibir, entender, predecir y manipular un mundo mucho más grande y complicado que ella misma. El campo de la **inteligencia artificial**, o IA, va más allá: no sólo intenta comprender, sino que también se esfuerza en construir entidades inteligentes.

La IA es una de las ciencias más recientes. El trabajo comenzó poco después de la Segunda Guerra Mundial, y el nombre se acuñó en 1956. La IA se cita, junto a la biología molecular, como un campo en el que a la mayoría de científicos de otras disciplinas «les gustaría trabajar». Un estudiante de ciencias físicas puede pensar razonablemente que todas las buenas ideas han sido ya propuestas por Galileo, Newton, Einstein y otros. Por el contrario, la IA aún tiene flecos sin cerrar en los que podrían trabajar varios Einsteins a tiempo completo.

La IA abarca en la actualidad una gran variedad de subcampos, que van desde áreas de propósito general, como el aprendizaje y la percepción, a otras más específicas como el ajedrez, la demostración de teoremas matemáticos, la escritura de poesía y el diagnóstico de enfermedades. La IA sintetiza y automatiza tareas intelectuales y es, por lo tanto, potencialmente relevante para cualquier ámbito de la actividad intelectual humana. En este sentido, es un campo genuinamente universal.

1.1 ¿Qué es la IA?

Hemos proclamado que la IA es excitante, pero no hemos dicho qué *es*. La Figura 1.1 presenta definiciones de inteligencia artificial extraídas de ocho libros de texto. Las que aparecen en la parte superior se refieren a *procesos mentales* y al *razonamiento*, mientras que las de la parte inferior aluden a la *conducta*. Las definiciones de la izquierda miden el éxito en términos de la fidelidad en la forma de actuar de los *humanos*, mientras que las de la derecha toman como referencia un concepto ideal de inteligencia, que llamaremos **racionalidad**. Un sistema es racional si hace «lo correcto», en función de su conocimiento.

RACIONALIDAD

A lo largo de la historia se han seguido los cuatro enfoques mencionados. Como es de esperar, existe un enfrentamiento entre los enfoques centrados en los humanos y los centrados en torno a la racionalidad[1]. El enfoque centrado en el comportamiento humano debe ser una ciencia empírica, que incluya hipótesis y confirmaciones mediante experimentos. El enfoque racional implica una combinación de matemáticas e ingeniería. Cada grupo al mismo tiempo ha ignorado y ha ayudado al otro. A continuación revisaremos cada uno de los cuatro enfoques con más detalle.

Sistemas que piensan como humanos	**Sistemas que piensan racionalmente**
«El nuevo y excitante esfuerzo de hacer que los computadores piensen… máquinas con mentes, en el más amplio sentido literal». (Haugeland, 1985)	«El estudio de las facultades mentales mediante el uso de modelos computacionales». (Charniak y McDermott, 1985)
«[La automatización de] actividades que vinculamos con procesos de pensamiento humano, actividades como la toma de decisiones, resolución de problemas, aprendizaje…» (Bellman, 1978)	«El estudio de los cálculos que hacen posible percibir, razonar y actuar». (Winston, 1992)
Sistemas que actúan como humanos	**Sistemas que actúan racionalmente**
«El arte de desarrollar máquinas con capacidad para realizar funciones que cuando son realizadas por personas requieren de inteligencia». (Kurzweil, 1990)	«La Inteligencia Computacional es el estudio del diseño de agentes inteligentes». (Poole *et al.*, 1998)
«El estudio de cómo lograr que los computadores realicen tareas que, por el momento, los humanos hacen mejor». (Rich y Knight, 1991)	«IA… está relacionada con conductas inteligentes en artefactos». (Nilsson, 1998)

Figura 1.1 Algunas definiciones de inteligencia artificial, organizadas en cuatro categorías.

[1] Conviene aclarar, que al distinguir entre comportamiento *humano* y *racional* no se está sugiriendo que los humanos son necesariamente «irracionales» en el sentido de «inestabilidad emocional» o «desequilibrio mental». Basta con darnos cuenta de que no somos perfectos: no todos somos maestros de ajedrez, incluso aquellos que conocemos todas las reglas del ajedrez; y desafortunadamente, no todos obtenemos un sobresaliente en un examen. Kahneman *et al.* (1982) ha elaborado un catálogo con algunos de los errores que sistemáticamente cometen los humanos cuando razonan.

Comportamiento humano: el enfoque de la Prueba de Turing

PRUEBA DE TURING

La **Prueba de Turing**, propuesta por Alan Turing (1950), se diseñó para proporcionar una definición operacional y satisfactoria de inteligencia. En vez de proporcionar una lista larga y quizá controvertida de cualidades necesarias para obtener inteligencia artificialmente, él sugirió una prueba basada en la incapacidad de diferenciar entre entidades inteligentes indiscutibles y seres humanos. El computador supera la prueba si un evaluador humano no es capaz de distinguir si las respuestas, a una serie de preguntas planteadas, son de una persona o no. En el Capítulo 26 se comentan detalles de esta prueba y se discute si un computador que supera la prueba es realmente inteligente. Hoy por hoy, podemos decir que programar un computador para que supere la prueba requiere un trabajo considerable. El computador debería poseer las siguientes capacidades:

PROCESAMIENTO DE LENGUAJE NATURAL

REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

RAZONAMIENTO AUTOMÁTICO

APRENDIZAJE MÁQUINA

- **Procesamiento de lenguaje natural** que le permita comunicarse satisfactoriamente en inglés.
- **Representación del conocimiento** para almacenar lo que se conoce o siente.
- **Razonamiento automático** para utilizar la información almacenada para responder a preguntas y extraer nuevas conclusiones.
- **Aprendizaje automático** para adaptarse a nuevas circunstancias y para detectar y extrapolar patrones.

La Prueba de Turing evitó deliberadamente la interacción *física* directa entre el evaluador y el computador, dado que para medir la inteligencia es innecesario simular físicamente a una persona. Sin embargo, la llamada Prueba Global de Turing incluye una señal de vídeo que permite al evaluador valorar la capacidad de percepción del evaluado, y también le da la oportunidad al evaluador de pasar objetos físicos «a través de una ventanita». Para superar la Prueba Global de Turing el computador debe estar dotado de

PRUEBA DE TURING GLOBAL

VISTA COMPUTACIONAL

ROBÓTICA

- **Visión computacional** para percibir objetos.
- **Robótica** para manipular y mover objetos.

Estas seis disciplinas abarcan la mayor parte de la IA, y Turing merece ser reconocido por diseñar una prueba que se conserva vigente después de 50 años. Los investigadores del campo de la IA han dedicado poco esfuerzo a la evaluación de sus sistemas con la Prueba de Turing, por creer que es más importante el estudio de los principios en los que se basa la inteligencia que duplicar un ejemplar. La búsqueda de un ingenio que «volara artificialmente» tuvo éxito cuando los hermanos Wright, entre otros, dejaron de imitar a los pájaros y comprendieron los principios de la aerodinámica. Los textos de ingeniería aerodinámica no definen el objetivo de su campo como la construcción de «máquinas que vuelen como palomas de forma que puedan incluso confundir a otras palomas».

Pensar como un humano: el enfoque del modelo cognitivo

Para poder decir que un programa dado piensa como un humano, es necesario contar con un mecanismo para determinar cómo piensan los humanos. Es necesario *penetrar* en el

funcionamiento de las mentes humanas. Hay dos formas de hacerlo: mediante introspección (intentando atrapar nuestros propios pensamientos conforme éstos van apareciendo) y mediante experimentos psicológicos. Una vez se cuente con una teoría lo suficientemente precisa sobre cómo trabaja la mente, se podrá expresar esa teoría en la forma de un programa de computador. Si los datos de entrada/salida del programa y los tiempos de reacción son similares a los de un humano, existe la evidencia de que algunos de los mecanismos del programa se pueden comparar con los que utilizan los seres humanos. Por ejemplo, a Allen Newell y Herbert Simon, que desarrollaron el «Sistema de Resolución General de Problemas» (SRGP) (Newell y Simon, 1961), no les bastó con que su programa resolviera correctamente los problemas propuestos. Lo que les interesaba era seguir la pista de las etapas del proceso de razonamiento y compararlas con las seguidas por humanos a los que se les enfrentó a los mismos problemas. En el campo interdisciplinario de la **ciencia cognitiva** convergen modelos computacionales de IA y técnicas experimentales de psicología intentando elaborar teorías precisas y verificables sobre el funcionamiento de la mente humana.

CIENCIA COGNITIVA

La ciencia cognitiva es un campo fascinante, merecedora de una enciclopedia dedicada a ella (Wilson y Keil, 1999). En este libro no se intenta describir qué se conoce de la cognición humana. Ocasionalmente se hacen comentarios acerca de similitudes o diferencias entre técnicas de IA y cognición humana. La auténtica ciencia cognitiva se fundamenta necesariamente en la investigación experimental en humanos y animales, y en esta obra se asume que el lector sólo tiene acceso a un computador para experimentar.

En los comienzos de la IA había confusión entre las distintas aproximaciones: un autor podría argumentar que un algoritmo resolvía adecuadamente una tarea y que *por tanto* era un buen modelo de representación humana, o viceversa. Los autores actuales hacen diferencia entre las dos reivindicaciones; esta distinción ha permitido que ambas disciplinas, IA y ciencia cognitiva, se desarrollen más rápidamente. Los dos campos continúan alimentándose entre sí, especialmente en las áreas de la visión y el lenguaje natural. En particular, el campo de la visión ha avanzado recientemente con la ayuda de una propuesta integrada que tiene en cuenta la evidencia neurofisiológica y los modelos computacionales.

Pensamiento racional: el enfoque de las «leyes del pensamiento»

El filósofo griego Aristóteles fue uno de los primeros en intentar codificar la «manera correcta de pensar», es decir, un proceso de razonamiento irrefutable. Sus **silogismos** son esquemas de estructuras de argumentación mediante las que siempre se llega a conclusiones correctas si se parte de premisas correctas (por ejemplo: «Sócrates es un hombre; todos los hombres son mortales; por lo tanto Sócrates es mortal»). Estas leyes de pensamiento supuestamente gobiernan la manera de operar de la mente; su estudio fue el inicio de un campo llamado **lógica**.

SILOGISMOS

LÓGICA

Estudiosos de la lógica desarrollaron, en el siglo XIX, una notación precisa para definir sentencias sobre todo tipo de elementos del mundo y especificar relaciones entre

ellos (compárese esto con la notación aritmética común, que prácticamente sólo sirve para representar afirmaciones acerca de la igualdad y desigualdad entre números). Ya en 1965 existían programas que, en principio, resolvían *cualquier* problema resoluble descrito en notación lógica[2]. La llamada tradición **logista** dentro del campo de la inteligencia artificial trata de construir sistemas inteligentes a partir de estos programas.

LOGISTA

Este enfoque presenta dos obstáculos. No es fácil transformar conocimiento informal y expresarlo en los términos formales que requieren de notación lógica, particularmente cuando el conocimiento que se tiene es inferior al 100 por 100. En segundo lugar, hay una gran diferencia entre poder resolver un problema «en principio» y hacerlo en la práctica. Incluso problemas con apenas una docena de datos pueden agotar los recursos computacionales de cualquier computador a menos que cuente con alguna directiva sobre los pasos de razonamiento que hay que llevar a cabo primero. Aunque los dos obstáculos anteriores están presentes en *todo* intento de construir sistemas de razonamiento computacional, surgieron por primera vez en la tradición lógica.

Actuar de forma racional: el enfoque del agente racional

AGENTE

Un **agente** es algo que razona (*agente* viene del latín *agere*, hacer). Pero de los agentes informáticos se espera que tengan otros atributos que los distingan de los «programas» convencionales, como que estén dotados de controles autónomos, que perciban su entorno, que persistan durante un período de tiempo prolongado, que se adapten a los cambios, y que sean capaces de alcanzar objetivos diferentes. Un **agente racional** es aquel que actúa con la intención de alcanzar el mejor resultado o, cuando hay incertidumbre, el mejor resultado esperado.

AGENTE RACIONAL

En el caso del enfoque de la IA según las «leyes del pensamiento», todo el énfasis se pone en hacer inferencias correctas. La obtención de estas inferencias correctas puede, a veces, formar *parte* de lo que se considera un agente racional, ya que una manera racional de actuar es llegar a la conclusión lógica de que si una acción dada permite alcanzar un objetivo, hay que llevar a cabo dicha acción. Sin embargo, el efectuar una inferencia correcta no depende siempre de la *racionalidad*, ya que existen situaciones para las que no hay nada correcto que hacer y en las que hay que tomar una decisión. Existen también formas de actuar racionalmente que no implican realizar inferencias. Por ejemplo, el retirar la mano de una estufa caliente es un acto reflejo mucho más eficiente que una respuesta lenta llevada a cabo tras una deliberación cuidadosa.

Todas la habilidades que se necesitan en la Prueba de Turing deben permitir emprender acciones racionales. Por lo tanto, es necesario contar con la capacidad para representar el conocimiento y razonar basándonos en él, porque ello permitirá alcanzar decisiones correctas en una amplia gama de situaciones. Es necesario ser capaz de generar sentencias comprensibles en lenguaje natural, ya que el enunciado de tales oraciones permite a los agentes desenvolverse en una sociedad compleja. El aprendizaje no se lleva a cabo por erudición exclusivamente, sino que profundizar en el conocimiento de cómo funciona el mundo facilita la concepción de estrategias mejores para manejarse en él.

[2] Si no se encuentra una solución, el programa nunca debe parar de buscarla.

La percepción visual es necesaria no sólo porque ver es divertido, sino porque es necesaria para poder tener una idea mejor de lo que una acción puede llegar a representar, por ejemplo, el ver un delicioso bocadillo contribuirá a que nos acerquemos a él.

Por esta razón, el estudiar la IA desde el enfoque del diseño de un agente racional ofrece al menos dos ventajas. La primera es más general que el enfoque que proporcionan las «leyes del pensamiento», dado que el efectuar inferencias correctas es sólo uno de los mecanismos existentes para garantizar la racionalidad. La segunda es más afín a la forma en la que se ha producido el avance científico que los enfoques basados en la conducta o pensamiento humano, porque la norma de la racionalidad está claramente definida y es de aplicación general. Por el contrario, la conducta humana se adapta bien a un entorno específico, y en parte, es producto de un proceso evolutivo complejo, en gran medida desconocido, que aún está lejos de llevarnos a la perfección. *Por tanto, esta obra se centrará en los principios generales que rigen a los agentes racionales y en los elementos necesarios para construirlos*. Más adelante quedará patente que a pesar de la aparente facilidad con la que se puede describir un problema, cuando se intenta resolver surgen una enorme variedad de cuestiones. El Capítulo 2 revisa algunos de estos aspectos con más detalle.

Un elemento importante a tener en cuenta es el siguiente: más bien pronto que tarde se observará cómo obtener una racionalidad perfecta (hacer siempre lo correcto) no es posible en entornos complejos. La demanda computacional que esto implica es demasiado grande. En la mayor parte de esta obra se adoptará la hipótesis de trabajo de que la racionalidad perfecta es un buen punto de partida para el análisis. Lo cual simplifica el problema y proporciona el escenario base adecuado sobre el que se asientan los cimientos de este campo. Los Capítulos 6 y 17 se centran explícitamente en el tema de la **racionalidad limitada** (actuar adecuadamente cuando no se cuenta con el tiempo suficiente para efectuar todos los cálculos que serían deseables).

RACIONALIDAD LIMITADA

1.2 Los fundamentos de la inteligencia artificial

Esta sección presenta una breve historia de las disciplinas que han contribuido con ideas, puntos de vista y técnicas al desarrollo de la IA. Como toda revisión histórica, en este caso se centra en un pequeño número de personas, eventos e ideas e ignora otras que también fueron importantes. La historia se organiza en torno a una serie de cuestiones, dejando claro que no se quiere dar la impresión de que estas cuestiones son las únicas por las que las disciplinas se han preocupado y que el objetivo último de todas estas disciplinas era hacer avanzar la IA.

Filosofía (desde el año 428 a.C. hasta el presente)

- ¿Se pueden utilizar reglas formales para extraer conclusiones válidas?
- ¿Cómo se genera la inteligencia mental a partir de un cerebro físico?
- ¿De dónde viene el conocimiento?
- ¿Cómo se pasa del conocimiento a la acción?

Aristóteles (384-322 a.C.) fue el primero en formular un conjunto preciso de leyes que gobernaban la parte racional de la inteligencia. Él desarrolló un sistema informal para razonar adecuadamente con silogismos, que en principio permitía extraer conclusiones mecánicamente, a partir de premisas iniciales. Mucho después, Ramón Lull (d. 1315) tuvo la idea de que el razonamiento útil se podría obtener por medios artificiales. Sus «ideas» aparecen representadas en la portada de este manuscrito. Thomas Hobbes (1588-1679) propuso que el razonamiento era como la computación numérica, de forma que «nosotros sumamos y restamos silenciosamente en nuestros pensamientos». La automatización de la computación en sí misma estaba en marcha; alrededor de 1500, Leonardo da Vinci (1452-1519) diseñó, aunque no construyó, una calculadora mecánica; construcciones recientes han mostrado que su diseño era funcional. La primera máquina calculadora conocida se construyó alrededor de 1623 por el científico alemán Wilhelm Schickard (1592-1635), aunque la Pascalina, construida en 1642 por Blaise Pascal (1623-1662), sea más famosa. Pascal escribió que «la máquina aritmética produce efectos que parecen más similares a los pensamientos que a las acciones animales». Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) construyó un dispositivo mecánico con el objetivo de llevar a cabo operaciones sobre conceptos en lugar de sobre números, pero su campo de acción era muy limitado.

Ahora que sabemos que un conjunto de reglas pueden describir la parte racional y formal de la mente, el siguiente paso es considerar la mente como un sistema físico. René Descartes (1596-1650) proporciona la primera discusión clara sobre la distinción entre la mente y la materia y los problemas que surgen. Uno de los problemas de una concepción puramente física de la mente es que parece dejar poco margen de maniobra al libre albedrío: si el pensamiento está totalmente gobernado por leyes físicas, entonces una piedra podría «decidir» caer en dirección al centro de la Tierra gracias a su libre albedrío. A pesar de ser denodado defensor de la capacidad de razonamiento, Descartes fue un defensor del **dualismo**. Sostenía que existe una parte de la mente (o del alma o del espíritu) que está al margen de la naturaleza, exenta de la influencia de las leyes físicas. Los animales, por el contrario, no poseen esta cualidad dual; a ellos se le podría concebir como si se tratasen de máquinas. Una alternativa al dualismo es el **materialismo**, que considera que las operaciones del cerebro realizadas de acuerdo a las leyes de la física *constituyen* la mente. El libre albedrío es simplemente la forma en la que la percepción de las opciones disponibles aparecen en el proceso de selección.

DUALISMO

MATERIALISMO

Dada una mente física que gestiona conocimiento, el siguiente problema es establecer las fuentes de este conocimiento. El movimiento **empírico**, iniciado con el *Novum Organum*[3], de Francis Bacon (1561-1626), se caracteriza por el aforismo de John Locke (1632-1704): «Nada existe en la mente que no haya pasado antes por los sentidos». David Hume (1711-1776) propuso en *A Treatise of Human Nature* (Hume, 1739) lo que actualmente se conoce como principio de **inducción**: las reglas generales se obtienen mediante la exposición a asociaciones repetidas entres sus elementos. Sobre la base de las propuestas de Ludwig Wittgenstein (1889-1951) y Bertrand Russell (1872-1970), el famoso Círculo de Viena, liderado por Rudolf Carnap (1891-1970), desarrolló la doctrina del **positivismo lógico**. Esa doctrina sostiene que todo el conocimiento se puede

EMPÍRICO

INDUCCIÓN

[3] Una actualización del *Organon*, o instrumento de pensamiento, de Aristóteles.

caracterizar mediante teorías lógicas relacionadas, en última instancia, con **sentencias de observación** que corresponden a estímulos sensoriales[4]. La **teoría de la confirmación** de Carnap y Carl Hempel (1905-1997) intenta explicar cómo el conocimiento se obtiene a partir de la experiencia. El libro de Carnap, *The Logical Structure of the World* (1928), define un procedimiento computacional explícito para la extracción de conocimiento a partir de experiencias primarias. Fue posiblemente la primera teoría en mostrar la mente como un proceso computacional.

POSITIVISMO LÓGICO

SENTENCIA DE OBSERVACIÓN

TEORÍA DE LA CONFIRMACIÓN

El último elemento en esta discusión filosófica sobre la mente es la relación que existe entre conocimiento y acción. Este asunto es vital para la IA, ya que la inteligencia requiere tanto acción como razonamiento. Más aún, simplemente con comprender cómo se justifican determinadas acciones se puede llegar a saber cómo construir un agente cuyas acciones sean justificables (o racionales). Aristóteles argumenta que las acciones se pueden justificar por la conexión lógica entre los objetivos y el conocimiento de los efectos de las acciones (la última parte de este extracto también aparece en la portada de este libro):

> ¿Cómo es que el pensamiento viene acompañado en algunos casos de acciones y en otros no?, ¿en algunos casos por movimiento y en otros no? Parece como si la misma cosa sucediera tanto si razonáramos o hiciéramos inferencias sobre objetos que no cambian; pero en este caso el fin es una proposición especulativa... mientras la conclusión resultante de las dos premisas es una acción... Yo necesito abrigarme; una manta abriga. Yo necesito una manta. Qué necesito, qué debo hacer; necesito una manta. Necesito hacer una manta. Y la conclusión, «Yo tengo que hacer una manta», es una acción. (Nussbaum, 1978, p. 40)

En *Nicomachean Ethics* (Libro III. 3, 1112b), Aristóteles continúa trabajando en este tema, sugiriendo un algoritmo:

> Nosotros no reflexionamos sobre los fines, sino sobre los medios. Un médico no reflexiona sobre si debe curar, ni un orador sobre si debe persuadir... Ellos asumen el fin y consideran cómo y con qué medios se obtienen, y si resulta fácil y es por tanto productivo; mientras que si sólo se puede alcanzar por un medio se tiene en consideración *cómo* se alcanzará por este y por qué medios se obtendrá *éste*, hasta que se llegue a la causa primera..., y lo último en el orden del análisis parece ser lo primero en el orden de los acontecimientos. Y si se llega a un estado imposible, se abandona la búsqueda, como por ejemplo si se necesita dinero y no se puede conseguir; pero si hay una posibilidad se intentará.

El algoritmo de Aristóteles se implementó 2.300 años más tarde por Newell y Simon con la ayuda de su programa SRGP. El cual se conoce como sistema de planificación regresivo (*véase* el Capítulo 11).

El análisis basado en objetivos es útil, pero no indica qué hacer cuando varias acciones nos llevan a la consecución del objetivo, o cuando ninguna acción facilita su completa consecución. Antoine Arnauld (1612-1694) describió correctamente una forma cuantitativa para decidir qué acción llevar a cabo en un caso como este (*véase* el Capítulo 16). El libro *Utilitarianism* (Mill, 1863) de John Stuart Mill (1806-1873) propone

[4] En este contexto, es posible comprobar o rechazar toda aseveración significativa mediante el análisis del significado de las palabras o mediante la experimentación. Dado que esto no es aplicable en la mayor parte del ámbito de la metafísica, como era intención, el positivismo lógico se hizo impopular en algunos círculos.

la idea de un criterio de decisión racional en todos los ámbitos de la actividad humana. En la siguiente sección se explica una teoría de la decisión más formalmente.

Matemáticas (aproximadamente desde el año 800 al presente)

- ¿Qué reglas formales son las adecuadas para obtener conclusiones válidas?
- ¿Qué se puede computar?
- ¿Cómo razonamos con información incierta?

Los filósofos delimitaron las ideas más importantes de la IA, pero para pasar de ahí a una ciencia formal es necesario contar con una formulación matemática en tres áreas fundamentales: lógica, computación y probabilidad.

El concepto de lógica formal se remonta a los filósofos de la antigua Grecia (*véase* el Capítulo 7), pero su desarrollo matemático comenzó realmente con el trabajo de George Boole (1815-1864) que definió la lógica proposicional o Booleana (Boole, 1847). En 1879, Gottlob Frege (1848-1925) extendió la lógica de Boole para incluir objetos y relaciones, y creó la lógica de primer orden que se utiliza hoy como el sistema más básico de representación de conocimiento[5]. Alfred Tarski (1902-1983) introdujo una teoría de referencia que enseña cómo relacionar objetos de una lógica con objetos del mundo real. El paso siguiente consistió en definir los límites de lo que se podía hacer con la lógica y la informática.

ALGORITMO

Se piensa que el primer **algoritmo** no trivial es el algoritmo Euclídeo para el cálculo del máximo común divisor. El considerar los algoritmos como objetos en sí mismos se remonta a la época de al-Khowarazmi, un matemático persa del siglo IX, con cuyos escritos también se introdujeron los números arábigos y el álgebra en Europa. Boole, entre otros, presentó algoritmos para llevar a cabo deducciones lógicas y hacia el final del siglo XIX se llevaron a cabo numerosos esfuerzos para formalizar el razonamiento matemático general con la lógica deductiva. En 1900, David Hilbert (1862-1943) presentó una lista de 23 problemas que acertadamente predijo ocuparían a los matemáticos durante todo ese siglo. En el último de ellos se preguntaba si existe un algoritmo que permita determinar la validez de cualquier proposición lógica en la que aparezcan números naturales (el famoso *Entscheidungsproblem*, o problema de decisión). Básicamente, lo que Hilbert se preguntaba es si hay límites fundamentales en la capacidad de los procedimientos efectivos de demostración. En 1930, Kurt Gödel (1906-1978) demostró que existe un procedimiento eficiente para demostrar cualquier aseveración verdadera en la lógica de primer orden de Frege y Russell, sin embargo con la lógica de primer orden no era posible capturar el principio de inducción matemática necesario para la caracterización de los números naturales. En 1931, demostró que, en efecto, existen límites reales. Mediante su **teorema de incompletitud** demostró que en cualquier lenguaje que tuviera la capacidad suficiente para expresar las propiedades de los números naturales, existen aseveraciones verdaderas no decidible en el sentido de que no es posible decidir su validez mediante ningún algoritmo.

TEOREMA DE INCOMPLETITUD

[5] La notación para la lógica de primer orden propuesta por Frege no se ha aceptado universalmente, por razones que son aparentemente obvias cuando se observa el ejemplo que aparece en la cubierta de este libro.

El resultado fundamental anterior se puede interpretar también como la indicación de que existen algunas funciones de los números enteros que no se pueden representar mediante un algoritmo, es decir no se pueden calcular. Lo anterior llevó a Alan Turing (1912-1954) a tratar de caracterizar exactamente aquellas funciones que sí *eran* susceptibles de ser caracterizadas. La noción anterior es de hecho problemática hasta cierto punto, porque no es posible dar una definición formal a la noción de cálculo o procedimiento efectivo. No obstante, la tesis de Church-Turing, que afirma que la máquina de Turing (Turing, 1936) es capaz de calcular cualquier función computable, goza de aceptación generalizada ya que proporciona una definición suficiente. Turing también demostró que existen algunas funciones que no se pueden calcular mediante la máquina de Turing. Por ejemplo, ninguna máquina puede decidir *en general* si un programa dado producirá una respuesta a partir de unas entradas, o si seguirá calculando indefinidamente.

INTRATABILIDAD

Si bien ser no decidible ni computable son importantes para comprender el proceso del cálculo, la noción de **intratabilidad** tuvo repercusiones más importantes. En términos generales se dice que un problema es intratable si el tiempo necesario para la resolución de casos particulares de dicho problema crece exponencialmente con el tamaño de dichos casos. La diferencia entre crecimiento polinomial y exponencial de la complejidad se destacó por primera vez a mediados de los años 60 (Cobham, 1964; Edmonds, 1965). Es importante porque un crecimiento exponencial implica la imposibilidad de resolver casos moderadamente grandes en un tiempo razonable. Por tanto, se debe optar por dividir el problema de la generación de una conducta inteligente en subproblemas que sean tratables en vez de manejar problemas intratables.

NP-COMPLETITUD

¿Cómo se puede reconocer un problema intratable? La teoría de la **NP-completitud**, propuesta por primera vez por Steven Cook (1971) y Richard Karp (1972) propone un método. Cook y Karp demostraron la existencia de grandes clases de problemas de razonamiento y búsqueda combinatoria canónica que son NP completos. Toda clase de problema a la que la clase de problemas NP completos se pueda reducir será seguramente intratable (aunque no se ha demostrado que los problemas NP completos son necesariamente intratables, la mayor parte de los teóricos así lo creen). Estos resultados contrastan con el optimismo con el que la prensa popular recibió a los primeros computadores, «Supercerebros Electrónicos» que eran «¡Más rápidos que Einstein!». A pesar del rápido incremento en la velocidad de los computadores, los sistemas inteligentes se caracterizarán por el uso cuidadoso que hacen de los recursos. De manera sucinta, ¡el mundo es un ejemplo de problema *extremadamente* grande! Recientemente la IA ha ayudado a explicar por qué algunos ejemplos de problemas NP completos son difíciles de resolver y otros son fáciles (Cheeseman *et al*., 1991).

PROBABILIDAD

Además de la lógica y el cálculo, la tercera gran contribución de las matemáticas a la IA es la teoría de la **probabilidad**. El italiano Gerolamo Cardano (1501-1576) fue el primero en proponer la idea de probabilidad, presentándola en términos de los resultados de juegos de apuesta. La probabilidad se convirtió pronto en parte imprescindible de las ciencias cuantitativas, ayudando en el tratamiento de mediciones con incertidumbre y de teorías incompletas. Pierre Fermat (1601-1665), Blaise Pascal (1623-1662), James Bernoulli (1654-1705), Pierre Laplace (1749-1827), entre otros, hicieron avanzar esta teoría e introdujeron nuevos métodos estadísticos. Thomas Bayes (1702-1761) propuso una

regla para la actualización de probabilidades subjetivas a la luz de nuevas evidencias. La regla de Bayes y el área resultante llamado análisis Bayesiano conforman la base de las propuestas más modernas que abordan el razonamiento incierto en sistemas de IA.

Economía (desde el año 1776 hasta el presente)

- ¿Cómo se debe llevar a cabo el proceso de toma de decisiones para maximizar el rendimiento?
- ¿Cómo se deben llevar a cabo acciones cuando otros no colaboren?
- ¿Cómo se deben llevar a cabo acciones cuando los resultados se obtienen en un futuro lejano?

La ciencia de la economía comenzó en 1776, cuando el filósofo escocés Adam Smith (1723-1790) publicó *An Inquiri into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. Aunque los antiguos griegos, entre otros, habían hecho contribuciones al pensamiento económico, Smith fue el primero en tratarlo como una ciencia, utilizando la idea de que las economías pueden concebirse como un conjunto de agentes individuales que intentan maximizar su propio estado de bienestar económico. La mayor parte de la gente cree que la economía sólo se trata de dinero, pero los economistas dicen que ellos realmente estudian cómo la gente toma decisiones que les llevan a obtener los beneficios esperados. Léon Walras (1834-1910) formalizó el tratamiento matemático del «beneficio deseado» o **utilidad,** y fue posteriormente mejorado por Frank Ramsey (1931) y después por John von Neumann y Oskar Morgenstern en su libro *The Theory of Games and Economic Behavior* (1944).

TEORÍA DE LA DECISIÓN

La **teoría de la decisión**, que combina la teoría de la probabilidad con la teoría de la utilidad, proporciona un marco completo y formal para la toma de decisiones (económicas o de otra índole) realizadas bajo incertidumbre, esto es, en casos en los que las descripciones probabilísticas capturan adecuadamente la forma en la que se toman las decisiones en el entorno; lo cual es adecuado para «grandes» economías en las que cada agente no necesita prestar atención a las acciones que lleven a cabo el resto de los agentes individualmente. Cuando se trata de «pequeñas» economías, la situación se asemeja más a la de un **juego**: las acciones de un jugador pueden afectar significativamente a la utilidad de otro (tanto positiva como negativamente). Los desarrollos de von Neumann y Morgenstern a partir de la **teoría de juegos** (*véase* también Luce y Raiffa, 1957) mostraban el hecho sorprendente de que, en algunos juegos, un agente racional debía actuar de forma aleatoria o, al menos, aleatoria en apariencia con respecto a sus contrincantes.

TEORÍA DE JUEGOS

La gran mayoría de los economistas no se preocuparon de la tercera cuestión mencionada anteriormente, es decir, cómo tomar decisiones racionales cuando los resultados de las acciones no son inmediatos y por el contrario se obtienen los resultados de las acciones de forma *secuencial*. El campo de la **investigación operativa** persigue este objetivo; dicho campo emergió en la Segunda Guerra Mundial con los esfuerzos llevados a cabo en el Reino Unido en la optimización de instalaciones de radar, y posteriormente en aplicaciones civiles relacionadas con la toma de decisiones de dirección complejas. El trabajo de Richard Bellman (1957) formaliza una clase de problemas de decisión secuencial llamados **procesos de decisión de Markov**, que se estudiarán en los Capítulos 17 y 21.

INVESTIGACIÓN OPERATIVA

El trabajo en la economía y la investigación operativa ha contribuido en gran medida a la noción de agente racional que aquí se presenta, aunque durante muchos años la investigación en el campo de la IA se ha desarrollado por sendas separadas. Una razón fue la **complejidad** aparente que trae consigo el tomar decisiones racionales. Herbert Simon (1916-2001), uno de los primeros en investigar en el campo de la IA, ganó el premio Nobel en Economía en 1978 por su temprano trabajo, en el que mostró que los modelos basados en **satisfacción** (que toman decisiones que son «suficientemente buenas», en vez de realizar cálculos laboriosos para alcanzar decisiones óptimas) proporcionaban una descripción mejor del comportamiento humano real (Simon, 1947). En los años 90, hubo un resurgimiento del interés en las técnicas de decisión teórica para sistemas basados en agentes (Wellman, 1995).

SATISFACCIÓN

Neurociencia (desde el año 1861 hasta el presente)

- ¿Cómo procesa información el cerebro?

NEUROCIENCIA

La **Neurociencia** es el estudio del sistema neurológico, y en especial del cerebro. La forma exacta en la que en un cerebro se genera el pensamiento es uno de los grandes misterios de la ciencia. Se ha observado durante miles de años que el cerebro está de alguna manera involucrado en los procesos de pensamiento, ya que fuertes golpes en la cabeza pueden ocasionar minusvalía mental. También es ampliamente conocido que los cerebros humanos son de alguna manera diferentes; aproximadamente en el 335 a.C. Aristóteles escribió, «de entre todos los animales el hombre tiene el cerebro más grande en proporción a su tamaño»[6]. Aunque, no fue hasta mediados del siglo XVIII cuando se aceptó mayoritariamente que el cerebro es la base de la conciencia. Hasta este momento, se pensaba que estaba localizado en el corazón, el bazo y la glándula pineal.

El estudio de Paul Broca (1824-1880) sobre la afasia (dificultad para hablar) en pacientes con el cerebro dañado, en 1861, le dio fuerza a este campo y convenció a la sociedad médica de la existencia de áreas localizadas en el cerebro responsables de funciones cognitivas específicas. En particular, mostró que la producción del habla se localizaba en una parte del hemisferio izquierdo; hoy en día conocida como el área de Broca[7]. En esta época ya se sabía que el cerebro estaba formado por células nerviosas o **neuronas**, pero no fue hasta 1873 cuando Camillo Golgi (1843-1926) desarrolló una técnica de coloración que permitió la observación de neuronas individuales en el cerebro (*véase* la Figura 1.2). Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) utilizó esta técnica es sus estudios pioneros sobre la estructura neuronal del cerebro[8].

NEURONAS

En la actualidad se dispone de información sobre la relación existente entre las áreas del cerebro y las partes del cuerpo humano que controlan o de las que reciben impulsos

[6] Desde entonces, se ha descubierto que algunas especies de delfines y ballenas tienen cerebros relativamente grandes. Ahora se piensa que el gran tamaño de los cerebros humanos se debe en parte a la mejora reciente en su sistema de refrigeración.

[7] Muchos citan a Alexander Hood (1824) como una fuente posiblemente anterior.

[8] Golgi insistió en la creencia de que las funciones cerebrales se desarrollaron inicialmente en el medio continuo en el que las neuronas estaban inmersas, mientras que Cajal propuso la «doctrina neuronal». Ambos compartieron el premio Nobel en 1906 pronunciando un discurso de aceptación antagónico.

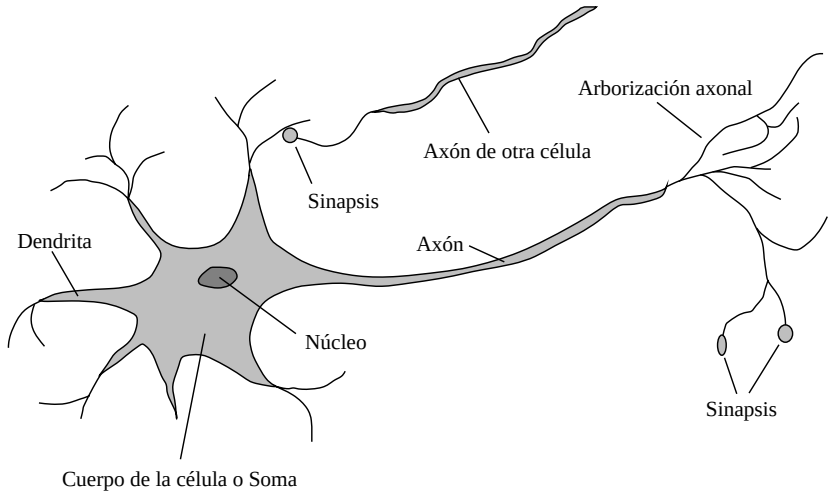


Figura 1.2 Partes de una célula nerviosa o neurona. Cada neurona contiene un cuerpo celular, o soma, que tiene un núcleo celular. Un número de fibras llamadas dendritas se ramifican a partir del cuerpo de la célula junto con una única fibra larga llamada axón. El axón se alarga considerablemente, mucho más que lo que se representa en esta imagen. Normalmente miden un centímetro (100 veces más que el diámetro del cuerpo de la célula), pero pueden alcanzar hasta un metro de longitud. Una neurona se conecta con entre 10 y 100.000 neuronas formando una maraña llamada sinapsis. Las señales se propagan de neurona a neurona mediante una reacción electroquímica complicada. Las señales controlan la actividad del cerebro a corto plazo, y permiten establecer cambios en la posición y conectividad de las neuronas a largo plazo. Se piensa que estos mecanismos forman la base del aprendizaje del cerebro. La mayoría del procesamiento de información se lleva a cabo en la corteza del cerebro, la capa más externa de éste. La unidad de organización básica es una columna de tejido de aproximadamente 0,5 mm de diámetro, con lo cual se amplía la profundidad total de la corteza cerebral, que en el caso de los humanos es de cuatro mm. Una columna contiene aproximadamente 20.000 neuronas.

sensoriales. Tales relaciones pueden cambiar de forma radical incluso en pocas semanas, y algunos animales parecen disponer de múltiples posibilidades. Más aún, no se tiene totalmente claro cómo algunas áreas se pueden encargar de ciertas funciones que eran responsabilidad de áreas dañadas. No hay prácticamente ninguna teoría que explique cómo se almacenan recuerdos individuales.

Los estudios sobre la actividad de los cerebros intactos comenzó en 1929 con el descubrimiento del electroencefalograma (EEG) desarrollado por Hans Berger. El reciente descubrimiento de las imágenes de resonancia magnética funcional (IRMF) (Ogawa *et al.*, 1990) está proporcionando a los neurólogos imágenes detalladas de la actividad cerebral sin precedentes, permitiéndoles obtener medidas que se corresponden con procesos cognitivos en desarrollo de manera muy interesante. Este campo está evolucionando gracias a los avances en los estudios en celdas individuales y su actividad neuronal. A pesar de estos avances, nos queda un largo camino para llegar a comprender cómo funcionan todos estos procesos cognitivos.

La conclusión verdaderamente increíble es que *una colección de simples células puede llegar a generar razonamiento, acción, y conciencia* o, dicho en otras palabras, *los cerebros generan las inteligencias* (Searle, 1992). La única teoría alternativa es el misticismo: que nos dice que existe alguna esfera mística en la que las mentes operan fuera del control de la ciencia física.

Cerebros y computadores digitales realizan tareas bastante diferentes y tienen propiedades distintas. La Figura 1.3 muestra cómo hay 1.000 veces más neuronas en un cerebro humano medio que puertas lógicas en la UCP de un computador estándar. La ley de Moore[9] predice que el número de puertas lógicas de la UCP se igualará con el de neuronas del cerebro alrededor del año 2020. Por supuesto, poco se puede inferir de esta predicción; más aún, la diferencia en la capacidad de almacenamiento es insignificante comparada con las diferencias en la velocidad de intercambio y en paralelismo. Los circuitos de los computadores pueden ejecutar una instrucción en un nanosegundo, mientras que las neuronas son millones de veces más lentas. Las neuronas y las sinapsis del cerebro están activas simultáneamente, mientras que los computadores actuales tienen una o como mucho varias UCP. Por tanto, incluso sabiendo que un computador es un millón de veces más rápido en cuanto a su velocidad de intercambio, el cerebro acaba siendo 100.000 veces más rápido en lo que hace.

Psicología (desde el año 1879 hasta el presente)

- ¿Cómo piensan y actúan los humanos y los animales?

La psicología científica se inició con los trabajos del físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894), según se referencia habitualmente, y su discípulo Wilhelm Wundt (1832-1920). Helmholtz aplicó el método científico al estudio de la vista humana, y su obra *Handbook of Physiological Optics*, todavía en nuestros días, se considera como «el tratado actual más importante sobre la física y la fisiología de la vista humana» (Nalwa, 1993, p. 15). En 1879, Wundt abrió el primer laboratorio de psicología experimental en

	Computador	Cerebro Humano
Unidades computacionales	1 UCP, 10^8 puertas	10^{11} neuronas
Unidades de Almacenamiento	10^{10} bits RAM	10^{11} neuronas
	10^{11} bits disco	10^{14} sinapsis
Duración de un ciclo	10^{-9} sec	10^{-3} sec
Ancho de banda	10^{10} bits/sec	10^{14} bits/sec
Memoria actualización/sec	10^9	10^{14}

Figura 1.3 Comparación básica entre los recursos de cómputo generales de que disponen los computadores (*circa 2003*) y el cerebro. Las cifras correspondientes a los computadores se han incrementado en al menos un factor 10 desde la primera edición de este libro, y se espera que suceda la mismo en esta década. Las cifras correspondientes al cerebro no han cambiado en los últimos 10.000 años.

[9] La ley de Moore dice que el número de transistores por pulgada cuadrada se duplica cada año o año y medio. La capacidad del cerebro humano se dobla aproximadamente cada dos o cuatro millones de años.

la Universidad de Leipzig. Wundt puso mucho énfasis en la realización de experimentos controlados cuidadosamente en la que sus operarios realizaban tareas de percepción o asociación al tiempo que sometían a introspección sus procesos mentales. Los meticulosos controles evolucionaron durante un largo período de tiempo hasta convertir la psicología en una ciencia, pero la naturaleza subjetiva de los datos hizo poco probable que un investigador pudiera contradecir sus propias teorías. Biólogos, estudiando el comportamiento humano, por el contrario, carecían de datos introspectivos y desarrollaron una metodología objetiva, tal y como describe H. S. Jennings (1906) en su influyente trabajo *Behavior of the Lower Organisms*. El movimiento **conductista**, liderado por John Watson (1878-1958) aplicó este punto de vista a los humanos, rechazando *cualquier* teoría en la que intervinieran procesos mentales, argumentando que la introspección no aportaba una evidencia fiable. Los conductistas insistieron en el estudio exclusivo de mediciones objetivas de percepciones (o *estímulos*) sobre animales y de las acciones resultantes (o *respuestas*). Construcciones mentales como conocimientos, creencias, objetivos y pasos en un razonamiento quedaron descartadas por ser consideradas «psicología popular» no científica. El conductismo hizo muchos descubrimientos utilizando ratas y palomas, pero tuvo menos éxito en la comprensión de los seres humanos. Aún así, su influencia en la psicología fue notable (especialmente en Estados Unidos) desde aproximadamente 1920 hasta 1960.

CONDUCTISMO

La conceptualización del cerebro como un dispositivo de procesamiento de información, característica principal de la **psicología cognitiva**, se remonta por lo menos a las obras de William James[10] (1842-1910). Helmholtz también pone énfasis en que la percepción entraña cierto tipo de inferencia lógica inconsciente. Este punto de vista cognitivo se vio eclipsado por el conductismo en Estados Unidos, pero en la Unidad de Psicología Aplicada de Cambridge, dirigida por Frederic Bartlett (1886-1969), los modelos cognitivos emergieron con fuerza. La obra *The Nature of Explanation*, de Kenneth Craik (1943), discípulo y sucesor de Bartlett, reestablece enérgicamente la legitimidad de términos «mentales» como creencias y objetivos, argumentando que son tan científicos como lo pueden ser la presión y la temperatura cuando se habla acerca de los gases, a pesar de que éstos estén formados por moléculas que no tienen ni presión ni temperatura. Craik establece tres elementos clave que hay que tener en cuenta para diseñar un agente basado en conocimiento: (1) el estímulo deberá ser traducido a una representación interna, (2) esta representación se debe manipular mediante procesos cognitivos para así generar nuevas representaciones internas, y (3) éstas, a su vez, se traducirán de nuevo en acciones. Dejó muy claro por qué consideraba que estos eran los requisitos idóneos para diseñar un agente:

PSICOLOGÍA COGNITIVA

> Si el organismo tiene en su cabeza «un modelo a pequeña escala» de la realidad externa y de todas sus posibles acciones, será capaz de probar diversas opciones, decidir cuál es la mejor, planificar su reacción ante posibles situaciones futuras antes de que éstas surjan, emplear lo aprendido de experiencias pasadas en situaciones presentes y futuras, y en todo momento, reaccionar ante los imprevistos que acontezcan de manera satisfactoria, segura y más competente (Craik, 1943).

[10] William James era hermano del novelista Henry James. Se comenta que Henry escribió novelas narrativas como si se tratara de psicología y William escribió sobre psicología como si se tratara de novelas narrativas.

Después de la muerte de Craik en un accidente de bicicleta en 1945, Donald Boadbent continuó su trabajo, y su libro *Perception and Communication* (1958) incluyó algunos de los primeros modelos de procesamiento de información del fenómeno psicológico. Mientras tanto, en Estados Unidos el desarrollo del modelo computacional llevo a la creación del campo de la **ciencia cognitiva**. Se puede decir que este campo comenzó en un simposio celebrado en el MIT, en septiembre de 1956 (como se verá a continuación este evento tuvo lugar sólo dos meses después de la conferencia en la que «nació» la IA). En este simposio, George Miller presentó *The Magic Number Seven*, Noam Chomsky presentó *Three Models of Language*, y Allen Newell y Herbert Simon presentaron *The Logic Theory Machine*. Estos tres artículos influyentes mostraron cómo se podían utilizar los modelos informáticos para modelar la psicología de la memoria, el lenguaje y el pensamiento lógico, respectivamente. Los psicólogos comparten en la actualidad el punto de vista común de que «la teoría cognitiva debe ser como un programa de computador» (Anderson, 1980), o dicho de otra forma, debe describir un mecanismo de procesamiento de información detallado, lo cual lleva consigo la implementación de algunas funciones cognitivas.

CIENCIA COGNITIVA

Ingeniería computacional (desde el año 1940 hasta el presente)

- ¿Cómo se puede construir un computador eficiente?

Para que la inteligencia artificial pueda llegar a ser una realidad se necesitan dos cosas: inteligencia y un artefacto. El computador ha sido el artefacto elegido. El computador electrónico digital moderno se inventó de manera independiente y casi simultánea por científicos en tres países involucrados en la Segunda Guerra Mundial. El equipo de Alan Turing construyó, en 1940, el primer computador *operacional* de carácter electromecánico, llamado Heath Robinson[11], con un único propósito: descifrar mensajes alemanes. En 1943 el mismo grupo desarrolló el Colossus, una máquina potente de propósito general basada en válvulas de vacío[12]. El primer computador operacional *programable* fue el Z-3, inventado por Konrad Zuse en Alemania, en 1941. Zuse también inventó los números de coma flotante y el primer lenguaje de programación de alto nivel, Plankalkül. El primer computador *electrónico*, el ABC, fue creado por John Atanasoff junto a su discípulo Clifford Berry entre 1940 y 1942 en la Universidad Estatal de Iowa. Las investigaciones de Atanasoff recibieron poco apoyo y reconocimiento; el ENIAC, desarrollado en el marco de un proyecto militar secreto, en la Universidad de Pensilvania, por un equipo en el que trabajaban entre otros John Mauchly y John Eckert, puede considerarse como el precursor de los computadores modernos.

Desde mediados del siglo pasado, cada generación de dispositivos *hardware* ha conllevado un aumento en la velocidad de proceso y en la capacidad de almacenamiento,

[11] Heath Robinson fue un caricaturista famoso por sus dibujos, que representaban artefactos de uso diario, caprichosos y absurdamente complicados, por ejemplo, uno para untar mantequilla en el pan tostado.

[12] En la postguerra, Turing quiso utilizar estos computadores para investigar en el campo de la IA, por ejemplo, desarrollando uno de los primeros programas para jugar a la ajedrez (Turing *et al.*, 1953). El gobierno británico bloqueó sus esfuerzos.

así como una reducción de precios. La potencia de los computadores se dobla cada 18 meses aproximadamente y seguirá a este ritmo durante una o dos décadas más. Después, se necesitará ingeniería molecular y otras tecnologías novedosas.

Por supuesto que antes de la aparición de los computadores ya había dispositivos de cálculo. Las primeras máquinas automáticas, que datan del siglo XVII, ya se mencionaron en la página seis. La primera máquina programable fue un telar, desarrollado en 1805 por Joseph Marie Jacquard (1752-1834) que utilizaba tarjetas perforadas para almacenar información sobre los patrones de los bordados. A mediados del siglo XIX, Charles Babbage (1792-1871) diseñó dos máquinas, que no llegó a construir. La «Máquina de Diferencias», que aparece en la portada de este manuscrito, se concibió con la intención de facilitar los cálculos de tablas matemáticas para proyectos científicos y de ingeniería. Finalmente se construyó y se presentó en 1991 en el Museo de la Ciencia de Londres (Swade, 1993). La «Máquina Analítica» de Babbage era mucho más ambiciosa: incluía memoria direccionable, programas almacenados y saltos condicionales; fue el primer artefacto dotado de los elementos necesarios para realizar una computación universal. Ada Lovelace, colega de Babbage e hija del poeta Lord Byron, fue seguramente la primera programadora (el lenguaje de programación Ada se llama así en honor a esta programadora). Ella escribió programas para la inacabada Máquina Analítica e incluso especuló acerca de la posibilidad de que la máquina jugara al ajedrez y compusiese música.

La IA también tiene una deuda con la parte *software* de la informática que ha proporcionado los sistemas operativos, los lenguajes de programación, y las herramientas necesarias para escribir programas modernos (y artículos sobre ellos). Sin embargo, en este área la deuda se ha saldado: la investigación en IA ha generado numerosas ideas novedosas de las que se ha beneficiado la informática en general, como por ejemplo el tiempo compartido, los intérpretes imperativos, los computadores personales con interfaces gráficas y ratones, entornos de desarrollo rápido, listas enlazadas, administración automática de memoria, y conceptos claves de la programación simbólica, funcional, dinámica y orientada a objetos.

Teoría de control y cibernética (desde el año 1948 hasta el presente)

- ¿Cómo pueden los artefactos operar bajo su propio control?

Ktesibios de Alejandría (250 a.C.) construyó la primera máquina auto controlada: un reloj de agua con un regulador que mantenía el flujo de agua circulando por él, con un ritmo constante y predecible. Esta invención cambió la definición de lo que un artefacto podía hacer. Anteriormente, solamente seres vivos podían modificar su comportamiento como respuesta a cambios en su entorno. Otros ejemplos de sistemas de control auto regulables y retroalimentados son el motor de vapor, creado por James Watt (1736-1819), y el termostato, inventado por Cornelis Drebbel (1572-1633), que también inventó el submarino. La teoría matemática de los sistemas con retroalimentación estables se desarrolló en el siglo XIX.

TEORÍA DE CONTROL

La figura central del desarrollo de lo que ahora se llama la **teoría de control** fue Norbert Wiener (1894-1964). Wiener fue un matemático brillante que trabajó en sistemas de control biológicos y mecánicos y en sus vínculos con la cognición. De la misma forma que Craik (quien también utilizó sistemas de control como modelos psicológicos), Wiener y sus colegas Arturo Rosenblueth y Julian Bigelow desafiaron la ortodoxia conductista (Rosenblueth *et al.*, 1943). Ellos veían el comportamiento determinista como algo emergente de un mecanismo regulador que intenta minimizar el «error» (la diferencia entre el estado presente y el estado objetivo). A finales de los años 40, Wiener, junto a Warren McCulloch, Walter Pitts y John von Neumann, organizaron una serie de conferencias en las que se exploraban los nuevos modelos cognitivos matemáticos y computacionales, e influyeron en muchos otros investigadores en el campo de las ciencias del comportamiento. El libro de Wiener, *Cybernetics* (1948), fue un *bestseller* y desveló al público las posibilidades de las máquinas con inteligencia artificial.

CIBERNÉTICA

FUNCIÓN OBJETIVO

La teoría de control moderna, especialmente la rama conocida como control óptimo estocástico, tiene como objetivo el diseño de sistemas que maximizan una **función objetivo** en el tiempo. Lo cual se asemeja ligeramente a nuestra visión de lo que es la IA: diseño de sistemas que se comportan de forma óptima. ¿Por qué, entonces, IA y teoría de control son dos campos diferentes, especialmente teniendo en cuenta la cercana relación entre sus creadores? La respuesta está en el gran acoplamiento existente entre las técnicas matemáticas con las que estaban familiarizados los investigadores y entre los conjuntos de problemas que se abordaban desde cada uno de los puntos de vista. El cálculo y el álgebra matricial, herramientas de la teoría de control, se utilizaron en la definición de sistemas que se podían describir mediante conjuntos fijos de variables continuas; más aún, el análisis exacto es sólo posible en sistemas *lineales*. La IA se fundó en parte para escapar de las limitaciones matemáticas de la teoría de control en los años 50. Las herramientas de inferencia lógica y computación permitieron a los investigadores de IA afrontar problemas relacionados con el lenguaje, visión y planificación, que estaban completamente fuera del punto de mira de la teoría de control.

Lingüística (desde el año 1957 hasta el presente)

- ¿Cómo está relacionado el lenguaje con el pensamiento?

En 1957, B. F. Skinner publicó *Verbal Behavior*. La obra presentaba una visión extensa y detallada desde el enfoque conductista al aprendizaje del lenguaje, y estaba escrita por los expertos más destacados de este campo. Curiosamente, una revisión de este libro llegó a ser tan famosa como la obra misma, y provocó el casi total desinterés por el conductismo. El autor de la revisión fue Noam Chomsky, quien acababa de publicar un libro sobre su propia teoría, *Syntactic Structures*. Chomsky mostró cómo la teoría conductista no abordaba el tema de la creatividad en el lenguaje: no explicaba cómo es posible que un niño sea capaz de entender y construir oraciones que nunca antes ha escuchado. La teoría de Chomsky (basada en modelos sintácticos que se remontaban al lingüista indio Panini, aproximadamente 350 a.C.) sí podía explicar lo anterior y, a diferencia de teorías anteriores, poseía el formalismo suficiente como para permitir su programación.

LINGÜÍSTICA COMPUTACIONAL

La lingüística moderna y la IA «nacieron», al mismo tiempo y maduraron juntas, solapándose en un campo híbrido llamado **lingüística computacional** o **procesamiento del lenguaje natural**. El problema del entendimiento del lenguaje se mostró pronto mucho más complejo de lo que se había pensado en 1957. El entendimiento del lenguaje requiere la comprensión de la materia bajo estudio y de su contexto, y no solamente el entendimiento de la estructura de las sentencias. Lo cual puede parecer obvio, pero no lo fue para la mayoría de la comunidad investigadora hasta los años 60. Gran parte de los primeros trabajos de investigación en el área de la **representación del conocimiento** (el estudio de cómo representar el conocimiento de forma que el computador pueda razonar a partir de dicha representación) estaban vinculados al lenguaje y a la búsqueda de información en el campo del lenguaje, y su base eran las investigaciones realizadas durante décadas en el análisis filosófico del lenguaje.

1.3 Historia de la inteligencia artificial

Una vez revisado el material básico estamos ya en condiciones de cubrir el desarrollo de la IA propiamente dicha.

Génesis de la inteligencia artificial (1943–1955)

Warren McCulloch y Walter Pitts (1943) han sido reconocidos como los autores del primer trabajo de IA. Partieron de tres fuentes: conocimientos sobre la fisiología básica y funcionamiento de las neuronas en el cerebro, el análisis formal de la lógica proposicional de Russell y Whitehead y la teoría de la computación de Turing. Propusieron un modelo constituido por neuronas artificiales, en el que cada una de ellas se caracterizaba por estar «activada» o «desactivada»; la «activación» se daba como respuesta a la estimulación producida por una cantidad suficiente de neuronas vecinas. El estado de una neurona se veía como «equivalente, de hecho, a una proposición con unos estímulos adecuados». Mostraron, por ejemplo, que cualquier función de cómputo podría calcularse mediante alguna red de neuronas interconectadas, y que todos los conectores lógicos (*and*, *or*, *not*, etc.) se podrían implementar utilizando estructuras de red sencillas. McCulloch y Pitts también sugirieron que redes adecuadamente definidas podrían aprender. Donald Hebb (1949) propuso y demostró una sencilla regla de actualización para modificar las intensidades de las conexiones entre neuronas. Su regla, ahora llamada **de aprendizaje Hebbiano o de Hebb**, sigue vigente en la actualidad.

Dos estudiantes graduados en el Departamento de Matemáticas de Princeton, Marvin Minsky y Dean Edmonds, construyeron el primer computador a partir de una red neuronal en 1951. El SNARC, como se llamó, utilizaba 3.000 válvulas de vacío y un mecanismo de piloto automático obtenido de los desechos de un avión bombardero B-24 para simular una red con 40 neuronas. El comité encargado de evaluar el doctorado de Minsky veía con escepticismo el que este tipo de trabajo pudiera considerarse como matemático, pero se dice que von Newmann dijo, «Si no lo es actualmente, algún día lo será».

Minsky posteriormente probó teoremas influyentes que mostraron las limitaciones de la investigación con redes neuronales.

Hay un número de trabajos iniciales que se pueden caracterizar como de IA, pero fue Alan Turing quien articuló primero una visión de la IA en su artículo *Computing Machinery and Intelligence*, en 1950. Ahí, introdujo la prueba de Turing, el aprendizaje automático, los algoritmos genéricos y el aprendizaje por refuerzo.

Nacimiento de la inteligencia artificial (1956)

Princeton acogió a otras de la figuras señeras de la IA, John McCarthy. Posteriormente a su graduación, McCarthy se transladó al Dartmouth College, que se erigiría en el lugar del nacimiento oficial de este campo. McCarthy convenció a Minsky, Claude Shannon y Nathaniel Rochester para que le ayudaran a aumentar el interés de los investigadores americanos en la teoría de autómatas, las redes neuronales y el estudio de la inteligencia. Organizaron un taller con una duración de dos meses en Darmouth en el verano de 1956. Hubo diez asistentes en total, entre los que se incluían Trenchard More de Princeton, Arthur Samuel de IBM, y Ray Solomonoff y Oliver Selfridge del MIT.

Dos investigadores del Carnegie Tech[13], Allen Newell y Herbert Simon, acapararon la atención. Si bien los demás también tenían algunas ideas y, en algunos casos, programas para aplicaciones determinadas como el juego de damas, Newell y Simon contaban ya con un programa de razonamiento, el Teórico Lógico (TL), del que Simon afirmaba: «Hemos inventado un programa de computación capaz de pensar de manera no numérica, con lo que ha quedado resuelto el venerable problema de la dualidad mente-cuerpo»[14]. Poco después del término del taller, el programa ya era capaz de demostrar gran parte de los teoremas del Capítulo 2 de *Principia Matemática* de Russell y Whitehead. Se dice que Russell se manifestó complacido cuando Simon le mostró que la demostración de un teorema que el programa había generado era más corta que la que aparecía en *Principia*. Los editores de la revista *Journal of Symbolic Logic* resultaron menos impresionados y rechazaron un artículo cuyos autores eran Newell, Simon y el Teórico Lógico (TL).

El taller de Dartmouth no produjo ningún avance notable, pero puso en contacto a las figuras importantes de este campo. Durante los siguientes 20 años, el campo estuvo dominado por estos personajes, así como por sus estudiantes y colegas del MIT, CMU, Stanford e IBM. Quizá lo último que surgió del taller fue el consenso en adoptar el nuevo nombre propuesto por McCarthy para este campo: **Inteligencia Artificial**. Quizá «racionalidad computacional» hubiese sido más adecuado, pero «IA» se ha mantenido.

Revisando la propuesta del taller de Dartmouth (McCarthy *et al.*, 1955), se puede apreciar por qué fue necesario para la IA convertirse en un campo separado. ¿Por qué

[13] Actualmente Universidad Carnegie Mellon (UCM).

[14] Newell y Simon también desarrollaron un lenguaje de procesamiento de listas, IPL, para poder escribir el TL. No disponían de un compilador y lo tradujeron a código máquina a mano. Para evitar errores, trabajaron en paralelo, diciendo en voz alta números binarios, conforme escribían cada instrucción para asegurarse de que ambos coincidían.

no todo el trabajo hecho en el campo de la IA se ha realizado bajo el nombre de teoría de control, o investigación operativa, o teoría de la decisión, que, después de todo, persiguen objetivos similares a los de la IA? O, ¿por qué no es la IA una rama de las matemáticas? La primera respuesta es que la IA desde el primer momento abarcó la idea de duplicar facultades humanas como la creatividad, la auto-mejora y el uso del lenguaje. Ninguno de los otros campos tenían en cuenta esos temas. La segunda respuesta está relacionada con la metodología. La IA es el único de estos campos que es claramente una rama de la informática (aunque la investigación operativa comparte el énfasis en la simulación por computador), además la IA es el único campo que persigue la construcción de máquinas que funcionen automáticamente en medios complejos y cambiantes.

Entusiasmo inicial, grandes esperanzas (1952–1969)

Los primeros años de la IA estuvieron llenos de éxitos (aunque con ciertas limitaciones). Teniendo en cuenta lo primitivo de los computadores y las herramientas de programación de aquella época, y el hecho de que sólo unos pocos años antes, a los computadores se les consideraba como artefactos que podían realizar trabajos aritméticos y nada más, resultó sorprendente que un computador hiciese algo remotamente inteligente. La comunidad científica, en su mayoría, prefirió creer que «una máquina nunca podría hacer *tareas*» (*véase* el Capítulo 26 donde aparece una extensa lista de *tareas* recopilada por Turing). Naturalmente, los investigadores de IA responderían demostrando la realización de una *tarea* tras otra. John McCarthy se refiere a esta época como la era de «¡Mira, mamá, ahora sin manos!».

Al temprano éxito de Newell y Simon siguió el del sistema de resolución general de problemas, o SRGP. A diferencia del Teórico Lógico, desde un principio este programa se diseñó para que imitara protocolos de resolución de problemas de los seres humanos. Dentro del limitado número de puzles que podía manejar, resultó que la secuencia en la que el programa consideraba que los subobjetivos y las posibles acciones eran semejantes a la manera en que los seres humanos abordaban los mismos problemas. Es decir, el SRGP posiblemente fue el primer programa que incorporó el enfoque de «pensar como un ser humano». El éxito del SRGP y de los programas que le siguieron, como los modelos de cognición, llevaron a Newell y Simon (1976) a formular la famosa hipótesis del **sistema de símbolos físicos**, que afirma que «un sistema de símbolos físicos tiene los medios suficientes y necesarios para generar una acción inteligente». Lo que ellos querían decir es que cualquier sistema (humano o máquina) que exhibiese inteligencia debería operar manipulando estructuras de datos compuestas por símbolos. Posteriormente se verá que esta hipótesis se ha modificado atendiendo a distintos puntos de vista.

SISTEMA DE SÍMBOLOS FÍSICOS

En IBM, Nathaniel Rochester y sus colegas desarrollaron algunos de los primeros programas de IA. Herbert Gelernter (1959) construyó el demostrador de teoremas de geometría (DTG), el cual era capaz de probar teoremas que muchos estudiantes de matemáticas podían encontrar muy complejos de resolver. A comienzos 1952, Arthur Samuel escribió una serie de programas para el juego de las damas que eventualmente aprendieron a jugar hasta alcanzar un nivel equivalente al de un *amateur*. De paso, echó por

tierra la idea de que los computadores sólo pueden hacer lo que se les dice: su programa pronto aprendió a jugar mejor que su creador. El programa se presentó en la televisión en febrero de 1956 y causó una gran impresión. Como Turing, Samuel tenía dificultades para obtener el tiempo de cómputo. Trabajaba por las noches y utilizaba máquinas que aún estaban en período de prueba en la planta de fabricación de IBM. El Capítulo 6 trata el tema de los juegos, y en el Capítulo 21 se describe con detalle las técnicas de aprendizaje utilizadas por Samuel.

John McCarthy se trasladó de Darmouth al MIT, donde realizó tres contribuciones cruciales en un año histórico: 1958. En el Laboratorio de IA del MIT Memo Número 1, McCarthy definió el lenguaje de alto nivel **Lisp**, que se convertiría en el lenguaje de programación dominante en la IA. Lisp es el segundo lenguaje de programación más antiguo que se utiliza en la actualidad, ya que apareció un año después de FORTRAN. Con Lisp, McCarthy tenía la herramienta que necesitaba, pero el acceso a los escasos y costosos recursos de cómputo aún era un problema serio. Para solucionarlo, él, junto a otros miembros del MIT, inventaron el tiempo compartido. También, en 1958, McCarthy publicó un artículo titulado *Programs with Common Sense*, en el que describía el Generador de Consejos, un programa hipotético que podría considerarse como el primer sistema de IA completo. Al igual que el Teórico Lógico y el Demostrador de Teoremas de Geometría, McCarthy diseñó su programa para buscar la solución a problemas utilizando el conocimiento. Pero, a diferencia de los otros, manejaba el conocimiento general del mundo. Por ejemplo, mostró cómo algunos axiomas sencillos permitían a un programa generar un plan para conducirnos hasta el aeropuerto y tomar un avión. El programa se diseñó para que aceptase nuevos axiomas durante el curso normal de operación, permitiéndole así ser competente en áreas nuevas, sin *necesidad de reprogramación*. El Generador de Consejos incorporaba así los principios centrales de la representación del conocimiento y el razonamiento: es útil contar con una representación formal y explícita del mundo y de la forma en que la acción de un agente afecta al mundo, así como, ser capaces de manipular estas representaciones con procesos deductivos. Es sorprendente constatar cómo mucho de lo propuesto en el artículo escrito en 1958 permanece vigente incluso en la actualidad.

1958 fue el año en el que Marvin Minsky se trasladó al MIT. Sin embargo, su colaboración inicial no duró demasiado. McCarthy se centró en la representación y el razonamiento con lógica formal, mientras que Minsky estaba más interesado en lograr que los programas funcionaran y eventualmente desarrolló un punto de vista anti-lógico. En 1963 McCarthy creó el Laboratorio de IA en Stanford. Su plan para construir la versión más reciente del Generador de Consejos con ayuda de la lógica sufrió un considerable impulso gracias al descubrimiento de J. A. Robinson del método de resolución (un algoritmo completo para la demostración de teoremas para la lógica de primer orden; *véase* el Capítulo 9). El trabajo realizado en Stanford hacía énfasis en los métodos de propósito general para el razonamiento lógico. Algunas aplicaciones de la lógica incluían los sistemas de planificación y respuesta a preguntas de Cordell Green (1969b), así como el proyecto de robótica de Shakey en el nuevo Instituto de Investigación de Stanford (Stanford Research Institute, SRI). Este último proyecto, comentado en detalle en el Capítulo 25, fue el primero que demostró la total integración del razonamiento lógico y la actividad física.

Minsky supervisó el trabajo de una serie de estudiantes que eligieron un número de problemas limitados cuya solución pareció requerir inteligencia. Estos dominios limi-