

HERRAMIENTAS PARA CONSTRUIR MUNDOS VIDA ARTIFICIAL I

• ÁNGEL DE LA ENCARNACIÓN GARCÍA BAÑOS •



Universidad
del Valle

Programa  Editorial

Es un libro de texto sobre temas que explico habitualmente en las asignaturas Vida Artificial y Computación Evolutiva, de la carrera Ingeniería de Sistemas; compilado de una manera personal, pues lo oriento a explicar herramientas conocidas de matemáticas y computación que sirven para crear complejidad, y añado experiencias propias y de mis estudiantes.

Las herramientas que se explican en el libro son:

Realimentación: al conectar las salidas de un sistema para que afecten a sus propias entradas se producen bucles de realimentación que cambian por completo el comportamiento del sistema.

Fractales: son objetos matemáticos de muy alta complejidad aparente, pero cuyo algoritmo subyacente es muy simple.

Caos: sistemas dinámicos cuyo algoritmo es determinista y perfectamente conocido pero que, a pesar de ello, su comportamiento futuro no se puede predecir.

Leyes de potencias: sistemas que producen eventos con una distribución de probabilidad de cola gruesa, donde típicamente un 20% de los eventos contribuyen en un 80% al fenómeno bajo estudio.

Estos cuatro conceptos (realimentaciones, fractales, caos y leyes de potencia) están fuertemente asociados entre sí, y son los generadores básicos de complejidad.

Algoritmos evolutivos: si un sistema alcanza la complejidad suficiente (usando las herramientas anteriores) para ser capaz de sacar copias de sí mismo, entonces es inevitable que también aparezca la evolución.

Teoría de juegos: solo se da una introducción suficiente para entender que la cooperación entre individuos puede emerger incluso cuando las interacciones entre ellos se dan en términos competitivos.

Autómatas celulares: cuando hay una población de individuos similares que cooperan entre sí comunicándose localmente, entonces emergen fenómenos a nivel social, que son mucho más complejos todavía, como la capacidad de cómputo universal y la capacidad de autocopiar.



HERRAMIENTAS PARA CONSTRUIR MUNDOS VIDA ARTIFICIAL I

ÁNGEL DE LA ENCARNACIÓN GARCÍA BAÑOS



Colección Ciencias Naturales y Exactas

García Baños, Ángel de la Encarnación

Herramientas para construir mundos. Vida artificial I /
Ángel de la Encarnación García Baños. – Cali : Programa
Editorial Universidad del Valle, 2019.

316 páginas : ilustraciones ; 24 cm. -- (Colección ciencias
naturales y exactas)

Incluye bibliografías.

1. Caos (Ciencia) 2. Fractales 3. Algoritmos evolutivos
4. Teoría de los juegos 5. Autómatas celulares I. Tit. II. Serie.
003.857 cd 22 ed.

A1644706

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Universidad del Valle

Programa Editorial

Título: *Herramientas para construir mundos. Vida artificial I.*

Autor: Ángel de la Encarnación García Baños

ISBN PDF: 978-958-765-985-6

Colección: Ciencias Naturales y Exactas

Primera edición

Rector de la Universidad del Valle: Édgar Varela Barrios

Vicerrector de Investigaciones: Jaime R. Cantera Kintz

Director del Programa Editorial: Omar Díaz Saldaña

© Universidad del Valle

© Ángel de la Encarnación García Baños

Diseño y diagramación: Alejandro Soto Perez

Corrección de estilo: María Camila Cuenca O.

Este libro, o parte de él, no puede ser reproducido por ningún medio sin autorización escrita de la Universidad del Valle.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión del autor y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad del Valle, ni genera responsabilidad frente a terceros. El autor es el responsable del respeto a los derechos de autor y del material contenido en la publicación, razón por la cual la Universidad no puede asumir ninguna responsabilidad en caso de omisiones o errores.

Cali, Colombia, septiembre de 2019

HERRAMIENTAS PARA
CONSTRUIR MUNDOS
VIDA ARTIFICIAL I



Colección Ciencias Naturales y Exactas

Ángel de la Encarnación García B.

Madrid, España en 1960. Completó sus estudios de Ingeniero de Telecomunicación en 1985 en la Universidad Politécnica de Madrid. En 1987 se afincó en Colombia trabajando independientemente en su propia empresa. En 1993 ingresa a la Universidad del Valle, como profesor de Electrónica en temas que van desde los microprocesadores, interfaces, lógica digital, FPGAs, VHDL y tiempo real. En esa época realiza su doctorado en la Universidad Politécnica de Valencia, España, graduándose en 1999. A partir de allí se traslada al departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación donde trabaja en temas de programación orientada a objetos, sistemas operativos, vida artificial y computación evolutiva. Fundó el laboratorio EVALAB (Evolución y Vida Artificiales) y el grupo de investigación GUIA en Inteligencia Artificial. Hizo parte durante varios años del grupo de filosofía de la mente MENTIS. Autor de múltiples artículos publicados en revistas y actas de congresos.

CONTENIDO

PREFACIO	11
INTRODUCCIÓN	19
Resumen	21
Para saber más	21

CAPÍTULO 1

REALIMENTACIÓN	23
Realimentación negativa	26
Realimentación positiva	30
Realimentación distribuida	38
Resumen	47
Referencias	50

CAPÍTULO 2

FRACTALES	53
Fractales iterativos	53
Fractales de tiempo de escape	63
Fractales estocásticos	68
Fractales en la naturaleza	72
Espectro multifractal	75
Resumen	76
Para saber más	77
Referencias	79

CAPÍTULO 3

CAOS	81
Un sistema caótico muy sencillo: la curva logística	85
Otros sistemas que exhiben caos	96

Definiciones	103
Resumen	109
Para saber más	110
Referencias	114

CAPÍTULO 4

LEYES DE POTENCIAS	115
Resumen	125
Para saber más	125
Referencias	126

CAPÍTULO 5

ALGORITMOS EVOLUTIVOS	127
Algoritmos genéticos	129
Sistemas clasificadores evolutivos	171
Programación evolutiva	175
Estrategias evolutivas	178
Enfriamiento simulado	179
Evolución diferencial	182
Algoritmo genético híbrido de Taguchi	183
Programación genética	187
Evolución gramatical	194
Programación por expresión genética	197
Coevolución	201
Algoritmo evolutivo general básico	202
Resumen	213
Para saber más	214
Referencias	215

CAPÍTULO 6

TEORÍA DE JUEGOS	219
Dilema del prisionero	234
Tragedia de los comunes	236
Paradoja de Braess	236
Paradoja del votante	237
Señalización	237
Resumen	241
Para saber más	242
Referencias	243

CAPÍTULO 7

AUTÓMATAS CELULARES	245
Definiciones	246
Life	249
Autómatas celulares 1D	255
Autoduplicación	262
Resumen	278
Para saber más	279
Referencias	280

CAPÍTULO 8

SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE INGENIO	283
Torres de Hanoi	283
Dinero de bolsillo	284
Nave espacial	285
Velocidad de la luz	285
Bandera francesa	286
Para saber más	289
Referencias	290

CAPÍTULO 9

INTRODUCCIÓN A RUBY	291
Similitudes entre Ruby y Python	292
Diferencias entre Ruby y Python, a este nivel	292
Comentarios	293
Funciones	293
Paso de argumentos a funciones	294
Bucles	295
Verdadero y falso	295
Condicionales	296
Otra forma del condicional	296
Operadores lógicos	297
Arrays	297
Índices de los arrays	298
Arrays de dos dimensiones	298
Biblioteca estándar	298
Cómo imprimir en la pantalla	298
Interpolación	299
Cómo leer el teclado	299
Cómo convertir un <i>string</i> a entero, a flotante o a <i>string</i>	299

Ruby es OO puro	299
Iteradores	300
Clases y objetos	301
Composición de objetos	303
Metaprogramación	303
Para saber más	303
Referencias	304

CAPÍTULO 10

INTRODUCCIÓN A CUCUMBER	307
Para saber más	312
Referencias	312
Glosario	313

PREFACIO

La vida artificial es una disciplina relativamente nueva que surgió en 1987 en el primer congreso sobre el tema. Fue definida por su organizador Christopher Langton como “la vida, no como es, sino como podría ser”. A pesar de que llevamos trabajando durante tres décadas, considero que todavía es una disciplina poco madura pues le falta alcanzar su objetivo principal: crear vida artificial en el computador. Esto lo menciono sin pretender menoscabar los grandes avances que se han dado en el campo y que veremos a lo largo de este libro, pero lo cierto es que todavía no hemos logrado un gran éxito, como desarrollar un robot autónomo que se desenvuelva por su cuenta y que podamos decir que “es como si estuviese vivo”.

Pero ya casi.

El interés por esta disciplina ha ido en aumento y desde su comienzo se han escrito algunos libros muy buenos, aunque también podríamos decir que no han sido muchos. Cuando uno los lee se queda deslumbrado ante una variedad de técnicas, conceptos y ejemplos sorprendentes, pero que no se sabe muy bien a qué apuntan o por qué están allí. ¿Qué tiene que ver el caos con los autómatas celulares? ¿Usando ambos se logrará vida artificial? ¿Por qué? Y, por cierto, ¿qué es la vida artificial y cuáles son sus aplicaciones e importancia, aparte de hacer dibujos animados muy realistas? Estas y muchas más son preguntas que surgen en los interesados en la vida artificial.

Y ahora, en lo que atañe más directamente al texto que propongo, ¿en qué se diferencia de otros que tocan el mismo tema? El tema es tan amplio que se hizo necesario separarlo en dos libros (aunque podrían ser más en el futuro): en el primero, titulado *Herramientas para construir mundos*, contemplo

todas las técnicas en detalle para que sirvan como ayuda a cualquier programador, informático o científico de la computación al desarrollar su propio *software*. A continuación presentaré una visión general de estos tópicos.

En primer lugar se habla de la realimentación, que ocurre cuando las acciones que realizas sobre un objeto de alguna manera se devuelven sobre ti, con lo cual la idea de causa y efecto se desvanece, a la vez que se hace más difícil predecir lo que cada acción va a desencadenar.

En el siguiente capítulo se presentan los fractales, unos objetos muy bonitos, con muchos detalles y colores, que se fabrican a partir de una fórmula matemática tan simple que nadie lo creería. Además, no parecen ser objetos comunes de una, dos o tres dimensiones —que corresponderían aproximadamente a una cuerda, una hoja de papel o una mesa—, sino que pueden tener otras dimensiones que no son números enteros, como 0.8 o 2.45.

Luego hacen su aparición los fenómenos caóticos, para los que es imposible predecir a largo plazo cuál va a ser su comportamiento, a pesar de conocerse todos sus detalles de funcionamiento y no contener ningún proceso que dependa del azar. El ejemplo más conocido es el clima y, gracias a ello, tenemos tema de conversación sobre cómo se han equivocado en las predicciones de ayer de la televisión. Sin embargo, existen muchos otros fenómenos caóticos que van desde las cotizaciones de acciones en la bolsa hasta nuestros propios movimientos al caminar, e incluso fenómenos fisiológicos como los latidos del corazón.

Pasamos luego a las leyes de potencia, las cuales son distribuciones de probabilidad que ocurren tanto en el ámbito humano como en las ciencias naturales. Se caracterizan porque hay unos pocos fenómenos dominantes que consumen la mayor parte de los recursos de un sistema. Muchas veces se enuncia de esta forma: el 20% de los clientes de un negocio generan el 80% de los beneficios; el 20% de las líneas de código de un programa son las causantes del 80% de los *bugs*; el 20% de las páginas web son visitadas por el 80% de los navegantes; el 20% de los terremotos producen el 80% de las víctimas. Son innumerables.

Estos cuatro conceptos, realimentación, fractales, caos y leyes de potencia, están entrelazados. Siempre que se da uno aparecen los demás —aun cuando la realimentación es el más fundamental—, y todos generan mucha complejidad a partir de muy poco. Son procesos creativos.

Los algoritmos evolutivos descritos en el sexto capítulo, son una generalización del proceso de la evolución descubierto por Darwin, y se aplican a todo tipo de problemas donde haya que buscar una solución u optimizarla. Y cuando digo “todo tipo” no estoy exagerando, pues sirven para problemas de *software*, de economía, de matemáticas, de diseño industrial, para jugar

y ganar cualquier juego e incluso para crear música o pintura. Posiblemente sean los algoritmos más simples que existen, pero a cambio son muy versátiles y robustos, tanto que se consideran uno de los pilares de la inteligencia artificial. Y aunque hay que admitir su lentitud, eso no es una gran desventaja gracias a la potencia de los computadores actuales. Después de todo, la evolución biológica necesitó varios miles de millones de años para llegar al cerebro humano. Con los computadores actuales se pueden lograr resultados interesantes en cuestión de minutos. Los algoritmos evolutivos son grandes creadores de complejidad, mucho más que los cuatro procesos anteriores. Sin embargo, exigen una condición difícil de lograr de forma espontánea: que los entes que van a evolucionar sean capaces de realizar copias de sí mismos. Todo ello lo analizaremos en detalle.

En el séptimo capítulo se presenta una somera introducción a la teoría de juegos, con el objetivo de entender cómo emerge la cooperación a partir de los procesos evolutivos que, en principio, son todo lo contrario (son competitivos). Veremos que la cooperación genera complejidad en cantidades enormes, mucho más que los algoritmos evolutivos por sí solos.

Por último, veremos los autómatas celulares, entendidos como una gran cantidad de individuos idénticos y muy simples, donde cada uno se comunica solo con sus vecinos. No hay ningún dato global ni tampoco un control central. A pesar de ello, y a partir de comportamientos tan simples, la sociedad en su conjunto puede desarrollar una complejidad todavía mayor a las que hemos enumerado. En particular, estudiaremos que una sociedad así es capaz de sacar copias de sí misma y de hacer cualquier tipo de cómputo.

Todo lo anterior forma parte del bagaje bien conocido en el mundo de la vida artificial, pero quiero presentarlo de una manera nueva que ya estoy mencionando a cada momento: como generadores de complejidad. La importancia de esto radica en la idea intuitiva que tenemos acerca de que los sistemas simples no pueden hacer mucho, mientras que los sistemas complejos pueden moverse, reaccionar a estímulos, adaptarse a su entorno, pensar e incluso ser conscientes de sí mismos (que son temas que veremos en el segundo libro). Por ello necesitamos primero conocer estas técnicas que fabrican sistemas complejos.

También para los programadores presento un ejemplo de algoritmo evolutivo, escrito por mí en lenguaje Ruby y usando metodología BDD (*Behavior Driven Development*) con la herramienta *Cucumber*. Uso *Ruby* porque es un lenguaje sencillo y elegante, con mínima sintaxis y gran expresividad. Después de 30 años programando principalmente en *C++*, que es perfecto pero complicado, y luchando contra muchos otros lenguajes incoherentes, descubrir Ruby ha sido una sorpresa refrescante pues me permite escribir

código conciso con poco esfuerzo. Pero sé que no es un lenguaje muy popular, de modo que en los apéndices también ofrezco una introducción básica a Ruby y Cucumber¹.

En el segundo libro, *La escalera de la complejidad*, exploro los aspectos filosóficos de la vida artificial bajo un hilo conductor que es, como indica el título, la complejidad. Veremos que, conforme aumenta, emergen propiedades nuevas por las que podremos decir que hemos creado un mundo computacional que disfruta de libertad, que está vivo, que es inteligente, o incluso que es consciente. A cada uno de estos temas les dedico un capítulo. Doy un enfoque nuevo a lo que significa libertad e inteligencia. Y presento mi visión de lo que es la consciencia bajo un punto de vista computacional, despojándola de todo misterio. La consciencia tiene varios aspectos que han desconcertado desde siempre a los filósofos, pero todos son entendibles desde esta perspectiva. Quizás sea este el aporte más importante de los dos libros.

Como veremos también, todas estas propiedades son graduales. Hay una cierta inteligencia en una ameba e incluso en un destornillador². Y aunque consideramos que tanto plantas como animales están vivos, en los animales la vida alcanza más posibilidades, como moverse rápidamente. Lo mismo se puede decir de la consciencia que existe en diversos grados en los animales y tal vez incluso en las plantas. De modo que es natural la aparición simultánea de varias propiedades. Si las presento en este orden es porque la consciencia más sofisticada que conocemos requiere un poco más de complejidad que la inteligencia más sofisticada que conocemos, que a su vez requiere más complejidad que la vida, y así sucesivamente. Explicaré que el único salto notable en complejidad se da al pasar de objetos que pueden computar a objetos vivos. Los demás saltos son relativamente pequeños. Y por eso utilizo como hilo conductor la complejidad, que es simplemente una fórmula. Al final, todos estos temas se reducen a matemáticas y, más concretamente, a computación.

Además, presento una idea nueva: un generador de complejidad evolutivo, que toma varios de los conceptos expuestos y los combina para crear una herramienta potente y general para fabricar sistemas complejos.

1 En el siguiente enlace al depósito de *software* Github se encuentra la información actualizada del libro con las erratas, el *software* y hojas de cálculo desarrolladas para su realización: <https://goo.gl/EB4gTq>

2 La mera existencia de los destornilladores y sus formas insinúan la existencia de los tornillos. Los tornillos no se podrían manipular sin el destornillador, de modo que el destornillador es como un artefacto de inteligencia congelada, que ayuda a realizar ciertos trabajos. En este sentido, posee una cierta inteligencia aun cuando no esté vivo.

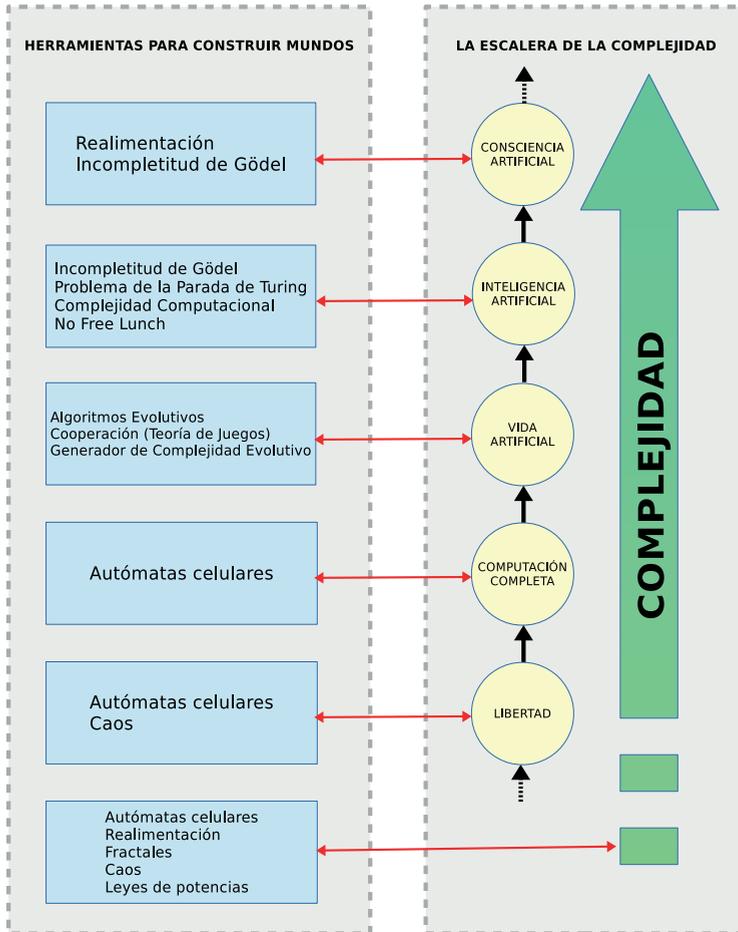


Figura 1. Estructura de los dos libros y relaciones entre ellos

En resumen, el primer libro es de sistematización del conocimiento para programadores, mientras que el segundo libro es de investigación, más filosófico. En la figura 1 vemos de abajo hacia arriba los temas que desarrollo en cada libro y la correspondencia entre ellos, es decir, qué herramientas hace falta conocer para entender cómo se caracteriza la complejidad de cada nivel de emergencia.

En ambos libros también incluyo recuadros que contienen información paralela: en color azul están unas pequeñas notas bibliográficas de los personajes más importantes que han contribuido en estos temas; en color verde hay problemas de ingenio que ilustran alguna idea recién presentada o que se va a presentar; y en amarillo están las ideas más importantes que deseo resaltar. Al final de cada libro incluyo las soluciones a esos problemas de ingenio que voy proponiendo para estimular la reflexión sobre ciertos temas.

Verás que con cierta frecuencia menciono cuentos y películas de ciencia ficción. Eso no hace que los libros sean menos rigurosos. Lo que hay que entender es que la investigación tiene dos fases, y cuando formulas una hipótesis, diseñas experimentos y verificas si los resultados están o no de acuerdo con la hipótesis, estás en la segunda fase. No se suele hablar de la primera fase —las ideas iniciales que llevan a plantear la hipótesis—, seguramente porque nadie sabe cómo hacerlo, no hay una metodología que te lleve a las buenas ideas.

Simplemente se requiere inspiración. Y es allí donde las novelas y películas que exploran libremente el futuro sin censuras, sin revisión de pares ni otra atadura, pueden servir como chispa creativa para generar esas buenas ideas. Un momento acertado para capturar las ideas generadas por el inconsciente se da al despertar, cuando aún no se ha logrado vencer del todo el sueño. El lóbulo frontal del cerebro no parece estar activado todavía, censurando los pensamientos para que sobrevivan únicamente los que están acordes con la realidad comúnmente aceptada, en una especie de proceso evolutivo de las ideas. Y, con la censura dormida, eso permite que surjan las ideas más locas. A veces incluso nos sirve estar distraídos en una actividad manual —como lavar los platos— para bajar el umbral de censura. Si quieres continuar investigando en estos temas te animo entonces a que leas mucho y veas cine, especialmente de ciencia ficción dura, y a que laves los platos con mayor frecuencia.

Además, en las referencias incluyo diversos videos, algunos de TED y otros de YouTube. Los primeros son reconocidos por su alta calidad y en ellos participan investigadores de primera línea. Se puede criticar a los segundos, debido a que son publicados libremente sin pasar por una revisión de pares. Y es verdad. Pero lo cierto es que a veces un video o una animación son más esclarecedores que todo el texto que yo pueda escribir aquí, de modo que corro gustoso el riesgo.

El público objetivo son los estudiantes que habitualmente toman mis asignaturas electivas de “Computación evolutiva” y “Vida artificial”, donde el requisito principal es tener experiencia en programación de computadores. No obstante, dada la época en que vivimos donde cualquier persona debería saber leer, escribir, la aritmética básica y programar, no es descabellado decir que estos dos volúmenes son también de divulgación, asequibles a personas con una mínima formación científica. En cualquier caso, cada libro se puede leer de manera independiente de acuerdo al interés del lector.

Desde el año 2000 trabajo como profesor en la Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad del Valle, dictando varias asignaturas incluidas las ya mencionadas. En estos libros pretendo reunir todo

el material de clase, darle una coherencia y mayor profundidad, así como añadir algunos temas nuevos. Para entender rápidamente en qué consisten estas asignaturas te diré que la computación evolutiva abarca muchos algoritmos de optimización inspirados en la evolución de Darwin, aunque aquí los mostraré desde otra perspectiva: algoritmos creativos. Y con la vida artificial se intenta construir mundos artificiales en el computador donde emerjan objetos con comportamientos tan complejos que pueden considerarse vivos, es decir, que se adaptan a su medio y se reproducen, colaborando o compitiendo con otros objetos.

Al pensar en el diseño de mundos artificiales es inevitable la pregunta de si nuestro propio mundo también lo es, o sea, si vivimos dentro de un computador, a la *Matrix*, o en alguna otra variante. Intentaré justificar una respuesta afirmativa a esta pregunta, bastante relacionada con una nueva concepción de la Física llamada *Digital Physics*, de la que haré algunos breves comentarios. El mundo es solo información.

Quiero agradecer a mi esposa Helga Rocío por todo su apoyo durante la escritura de estos libros, por hacer la primera revisión, ayudarme a organizar las referencias y hacer algunos bonitos dibujos. A mi hija Maya por ayudarme con la revisión del inglés de algunos artículos relacionados con este trabajo. Y a mi hermano Rafa por encontrar algunos de los errores más insospechados. El libro lo escribí en España durante mi año sabático del 2016-2017.

Y por ello también agradezco a la Universidad del Valle, pues nos ofrece a los profesores un tiempo para desarrollar ideas sin las presiones académicas y administrativas de todos los días. En la Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación disponemos del laboratorio EVALAB (evolución y vida artificiales), uno de varios donde opera el grupo GUIA de investigación en inteligencia artificial al que pertenezco. En ese laboratorio trabajan o han trabajado varios profesores (Irene Tischer, Víctor Andrés Bucheli Guerrero, Raúl Gutiérrez de Piñérez Reyes, Henry Antonio Saltaren Quiñones, Gabriel Conde Arango) y muchos estudiantes de pregrado, maestría y doctorado cuyos proyectos de fin de carrera se mencionan en el libro. Entre estos estudiantes, ahora ingenieros, quiero agradecer a Cristian Leonardo Ríos López que me haya cedido muy amablemente varias figuras de su trabajo de grado, y a Eider Falla que me haya permitido mostrar su *software* de la bandera francesa. Las discusiones con todos estos profesores y estudiantes han sido muy enriquecedoras a lo largo de tantos años, y recuerdo con especial agrado las reuniones de los martes en la tarde en el laboratorio y las generales en Piedralinda, debatiendo ideas y compartiendo un tiempo

con personas sensacionales. En ese ambiente fue posible escribir el presente libro, por lo que les agradezco mucho a todos ellos su esfuerzo.

Así mismo, durante mi paso por el grupo de filosofía MENTIS de la misma universidad, recuerdo con mucho agrado a profesores y estudiantes de filosofía quienes me iniciaron en el tema de la consciencia, Juan Manuel Cuartas Restrepo, Ómar Díaz Saldaña, Ernesto Enrique Combariza Cruz, Juan Carlos Vélez Rengifo y Germán Guerrero Pino.

También agradezco al profesor Jesús Alexander Aranda Bueno por revisarme el teorema de Gödel. Al profesor Carlos Alberto Mayora Pernía, por revisarme el inglés del primer artículo relacionado con este trabajo. Y al profesor Fabio Germán Guerrero Moreno siempre muy interesado en estos temas y que me hizo una pregunta que me ha mantenido activo buscando su respuesta por varias décadas: ¿cuáles son los límites computacionales fundamentales? A los evaluadores quiero agradecerles por sus generosos comentarios y útiles sugerencias.

Para terminar, doy las gracias a mis amigos José Arturo, Diana Lorena y Víctor Manuel por su apoyo continuado en este y otros proyectos, y por tantas horas dedicadas a conversar sobre ideas interesantes.

Desde luego que si quedan errores deben achacármelos a mí, como siempre se dice en estos casos, pero no por repetirlo deja de ser verdad. Mi principal afán fue presentar una disciplina coherente en las asignaturas que ofrezco y, especialmente, las ganas de aprender más. Espero despertar las mismas ganas a los lectores, aunque seguramente todos nos quedaremos con más preguntas que respuestas, pues es un tema abierto a más investigaciones.

El *software* y las figuras son míos excepto donde se indique lo contrario. Una parte procede de los cursos electivos que dicto habitualmente en la Universidad del Valle y el resto fueron diseñados *ex profeso* para estos libros. Los documentos de texto están escritos con *Libre Office 5.1.6.2* (usando *itálicas* para ecuaciones en el texto, tecnicismos y extranjerismos), corriendo sobre *Ubuntu 16.04LTS* y haciendo *backups* varias veces al día en diferentes medios, usando *Dropbox*, *rdiff-backup* y *git*. Como pueden imaginarse, en mi escuela estamos orgullosos de usar y apoyar el *software* libre.

INTRODUCCIÓN

EVALAB es un pequeño laboratorio de una modesta universidad ubicada en una ruidosa ciudad en un país tropical situado en un olvidado planeta de una remota galaxia.

ANA CRISTINA CALDERÓN CASTRILLÓN

La vida artificial es el estudio de las propiedades abstractas de los seres vivos, independientemente del sistema físico donde estén implementados. El sustrato de la vida natural es la química del carbono, pero podrían existir otros sustratos químicos, mecánicos, electrónicos e informáticos donde también sea posible crear sistemas que muestren las mismas propiedades. En general, la vida artificial intenta entender de dónde surge la complejidad de estos sistemas, creando herramientas matemáticas y computacionales para poder analizarla, manipularla y sintetizarla.

Desde un punto de vista computacional estamos buscando crear un sistema muy sencillo que sea capaz por sí mismo de aumentar su complejidad de forma autónoma, que decida su propio futuro, que se adapte a su entorno y sepa resolver los problemas que le vayan apareciendo. Para lograrlo prácticamente solo conocemos una manera: la realimentación, es decir, que la historia del sistema afecte a su futuro.

La realimentación es algo así como lo contrario a la independencia. En los sistemas donde lo que haga un agente no influye en lo que hagan los demás, jamás surgirá un comportamiento complejo. Y un agente que actúe independientemente de lo que le haya ocurrido en el pasado tampoco tendrá un comportamiento complejo. Veremos que hay dos tipos de reali-

mentación, positiva y negativa, y que cualquier sistema suele tener muchas realimentaciones simultáneamente. Por ello no solo es que la realimentación produce sistemas complejos, sino que también son complejos de analizar.

La realimentación produce una serie de efectos observables muy llamativos. La ciencia ha identificado y puesto nombre a tres de ellos, aunque seguramente hay muchos más. Son los fractales, el caos y las leyes de potencia. A ellos dedicaremos los tres siguientes capítulos.

Los fractales son figuras geométricas con infinitos detalles que muestran autosemejanza cuando se amplían o reducen de tamaño. Es lo que se denomina invariancia frente a cambios de escala. Pero a pesar de esa autosemejanza, al cambiar la escala pueden aparecer nuevas formas que nos sorprenden. Por otro lado, el fenómeno del caos ocurre en series de datos que transcurren a lo largo del tiempo y que pueden parecer periódicas pero realmente no lo son. También tienen y dependen de infinitos detalles y su atractor³ es un fractal. Y son impredecibles a largo plazo, a pesar de que no hay nada estocástico en ellas. Como tercer fenómeno aparecen las leyes de potencia que se caracterizan porque los eventos más grandes ocurren pocas veces (por ejemplo, grandes terremotos), mientras que los más pequeños ocurren muchas veces (por ejemplo, pequeños temblores). También se llaman distribuciones de densidad de probabilidad de tipo “cola gorda” porque ningún fenómeno tiene una probabilidad despreciable de ocurrir, y ello hace que no se puedan calcular promedios y que fallen las herramientas de predicción clásicas.

En sistemas que exhiban alguno de los tres fenómenos anteriores debidos a la realimentación, no es posible predecir exactamente su futuro. Son sistemas complejos de entender. Y nuestro objetivo será crearlos usando estas herramientas computacionales.

La realimentación puede ser distribuida, es decir, que el sistema esté formado por muchos agentes similares y que el futuro de cada uno de ellos dependa de la historia de todos. En estos sistemas no hay un control central que decida qué va a pasar, sino que el futuro depende de la interacción local entre agentes. Los agentes muy lejanos no se afectan entre sí, mientras que los cercanos sí lo pueden hacer. Esto implica la creación de una estructura espacial rudimentaria, siendo la más sencilla los autómatas celulares, que veremos en el último capítulo.

Pero los autómatas celulares son también una herramienta simple para entender cómo surge la capacidad de cómputo universal en un agente, que la necesita para desenvolverse en el mundo y tomar acciones para sobrevi-

3 Concepto técnico que se verá en el correspondiente capítulo.

vir. Además, estos autómatas permiten analizar cómo surge la capacidad de autocopiar, es decir, cómo puede un agente sacar una copia de sí mismo. En biología a ello se le llama tener hijos. Esta capacidad es primordial porque una vez que aparece también lo hace la evolución, entendida no solo desde el contexto biológico sino como un poderoso algoritmo computacional. Por ello, en el correspondiente capítulo mostraremos cómo funcionan los algoritmos evolutivos más importantes y una implementación concreta de uno de ellos en Ruby usando BDD.

Cuando tenemos una población de agentes sometidos a la evolución, la complejidad de todo el sistema aumenta bastante pues los agentes interactúan entre sí buscando su propio beneficio. Ello se estudia en el penúltimo capítulo, usando una herramienta matemática llamada teoría de juegos. Lo más interesante de ello es que la propia fuerza de la competencia genera finalmente cooperación.

La realimentación, la evolución y las interacciones entre agentes producen la aparición o el reforzamiento de otros fenómenos interesantes como la libertad, la inteligencia o la consciencia que se verán en el segundo libro.

RESUMEN

Para crear vida artificial en el computador se emplean una serie de herramientas que generan complejidad espontáneamente. La principal es la realimentación, que genera fenómenos fractales, caóticos y leyes de potencias. La realimentación distribuida se puede modelar muy bien usando autómatas celulares, que también sirven para entender cómo emerge la computación completa y la capacidad de autocopiar. Una vez que se da esta última, aparece la evolución. Los agentes que evolucionan interactúan entre sí para su propio beneficio, y ello se puede modelar usando la teoría de juegos.

Para saber más

Para ampliar el conocimiento en el tema de la vida artificial se incluye a continuación una lista de libros entretenidos, en varios idiomas.

- Cristoph Adami. (1998). *Introduction to Artificial Life*. New York: Springer-Verlag.
- Dante Augusto Couto Barone, Ana Lúcia Cetertich Bazzan, et ál. (2003). *Sociedades Artificiais: A Nova Fronteira da Inteligência nas Máquinas*. São Paulo: Artmed Editora.
- Claus Emmeche. (1998). *Vida simulada en el ordenador*. Barcelona: Gedisa Editorial.

- Julio Fernández Ostozala y Álvaro Moreno Bergareche. (1992). *Vida Artificial*. Madrid: Eudema.
- José Santos Reyes. (2007). *Vida Artificial: realizaciones computacionales*. A Coruña: Universidad de la Coruña.
- José Santos Reyes y Richard J. Duró Fernández. (2005). *Evolución artificial y robótica autónoma*. Madrid: RA-MA.

GLOSARIO

AC: Autómata celular. Un grafo regular e infinito, donde cada nodo está conectado bidireccionalmente solo con sus vecinos.

FSM: *Finite State Machine*, máquina de estados finitos. Grafo dirigido con una única marca indicando el estado activo. La marca puede moverse a otro estado a través de algún arco saliente de ese estado, si se cumple la condición indicada en el arco. Si hay más de una marca activa, se llama Red de Petri.

Estocástico: una secuencia es estocástica si cada término es imposible de predecir conociendo los anteriores. Las secuencias estocásticas también se pueden llamar al azar o no-deterministas. No es lo mismo que aleatorio, aunque mucha gente los confunde.

Aleatorio: una secuencia es aleatoria si no se puede comprimir. No es lo mismo que estocástico, aunque mucha gente los confunde.

Seudoaleatorio: es similar a un proceso caótico digital, con horizonte de predicción de una unidad de tiempo (o sea, solo se puede predecir la salida actual, pero no las siguientes, a partir de todas las entradas pasadas y de la fórmula) y donde permanece oculta la fórmula de conversión de entradas en salidas. El hecho de que sea digital implica que no hay ruido en las entradas, de modo que estrictamente hablando no es caótico. Pero la idea de un cortísimo horizonte de predictibilidad permanece.

Caótico: la definición rigurosa puede verse en el correspondiente capítulo, pero aproximadamente se puede decir que un proceso es caótico si es muy sensible a sus entradas, es decir, con un minúsculo cambio de la entrada, la salida cambia mucho. Eso hace que sean difíciles de predecir y suele haber un horizonte de predicción a partir del cual los errores acumulados hacen imposible anticipar el futuro del sistema.

Determinista: una secuencia de datos (o un proceso) es determinista si las sucesivas salidas (o estados) están completamente determinadas por las salidas anteriores (o estados anteriores). Los procesos deterministas convierten sus entradas en salidas por medio de una fórmula o un algoritmo que no contiene ningún elemento de azar. De modo que si se conocen las condiciones iniciales, se pueden predecir las salidas sucesivas. Y si las entradas se repiten, también lo hacen las salidas.

Fractal: un objeto geométrico cuya dimensión de Hausdorff-Besicovitch no coincide con su dimensión topológica. Informalmente se dice cuando un objeto tiene infinita rugosidad y autosemejanza en todas las escalas.



Universidad
del Valle

Programa ditorial

Ciudad Universitaria, Meléndez

Cali, Colombia

Tel.: (572) 321 2227

321 2100 ext. 7687

<http://programaeditorial.univalle.edu.co/>

E-mail: programa.editorial@correounivalle.edu.co