

Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos  
Programa de Maestría

Grupo de Trabajo UNAM-UACM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO  
Primavera de 2011



# Índice general

<b>I</b>	<b>Fundamentación</b>	<b>11</b>
<b>1.</b>	<b>Los objetivos de la UACM</b>	<b>13</b>
1.1.	El problema de los valores . . . . .	14
1.2.	Obsolescencia y cambio rápido . . . . .	15
1.3.	La interdisciplina . . . . .	16
1.4.	El cambio lento . . . . .	18
<b>2.</b>	<b>Una cosmovisión</b>	<b>21</b>
2.1.	La revolución científica . . . . .	22
2.2.	Los sistemas complejos . . . . .	24
2.3.	La dinámica no lineal . . . . .	28
2.4.	Consecuencias de esta cosmovisión . . . . .	31
<b>II</b>	<b>El programa</b>	<b>35</b>
<b>3.</b>	<b>Objetivos generales y perfiles</b>	<b>37</b>
3.1.	El perfil del egresado . . . . .	38
3.2.	El perfil de ingreso . . . . .	39
3.2.1.	Formación matemática . . . . .	39
3.2.2.	Requisitos de ingreso . . . . .	39
3.3.	Requisitos para obtener el grado . . . . .	40
<b>4.</b>	<b>El mapa curricular</b>	<b>41</b>
4.1.	Las líneas curriculares . . . . .	41
4.2.	De la presentación de los temas . . . . .	43
<b>5.</b>	<b>Líneas de investigación</b>	<b>47</b>

<b>III</b>	<b>Contenidos</b>	<b>49</b>
<b>6.</b>	<b>Ciencia y sociedad</b>	<b>51</b>
6.1.	Temario de Ciencia y Sociedad I . . . . .	53
6.2.	Temario de Ciencia y Sociedad II . . . . .	55
6.3.	Taller de Complejidad . . . . .	57
6.3.1.	Problemas específicos de la Ciudad de México . . . . .	58
6.3.2.	Política organizativa . . . . .	59
6.3.3.	Herramientas de representación y análisis . . . . .	59
6.4.	Bibliografía de la línea . . . . .	60
<b>7.</b>	<b>Dinámica no lineal</b>	<b>65</b>
7.1.	Temario de Dinámica no Lineal I . . . . .	66
7.2.	Temario de Dinámica no Lineal II . . . . .	68
7.3.	Temario de Dinámica no Lineal III . . . . .	70
7.4.	Procesos Estocásticos . . . . .	71
7.5.	Bibliografía de la línea . . . . .	73
7.5.1.	Sistemas deterministas . . . . .	73
7.5.2.	Procesos estocásticos . . . . .	75
<b>8.</b>	<b>Sistemas complejos</b>	<b>77</b>
8.1.	Temario de Sistemas Complejos I . . . . .	78
8.2.	Temario de Sistemas Complejos II . . . . .	81
8.3.	Bibliografía de la línea . . . . .	83
8.3.1.	Caos . . . . .	83
8.3.2.	Fractales . . . . .	86
8.3.3.	Complejidad . . . . .	87
8.3.4.	Para el Taller de Complejidad . . . . .	90
<b>IV</b>	<b>Apéndices</b>	<b>103</b>
<b>A.</b>	<b>De los cursos de apoyo</b>	<b>105</b>
A.1.	Álgebra superior y álgebra lineal . . . . .	105
A.1.1.	Contenido . . . . .	105
A.1.2.	Referencias . . . . .	106
A.2.	Ecuaciones diferenciales . . . . .	106
A.2.1.	Contenido . . . . .	106

A.2.2. Referencias . . . . .	107
A.3. Nociones de análisis matemático . . . . .	107
A.3.1. Contenido . . . . .	107
A.3.2. Referencias . . . . .	108



# Presentación

## Antecedentes

La Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) fue fundada en abril de 2001 como Universidad de la Ciudad de México (UCM); en marzo del año siguiente el rector, Ingeniero Manuel Pérez Rocha, invitó a un grupo de profesores e investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a plantear los lineamientos básicos para desarrollar un área de ciencias que iniciara las actividades de docencia, investigación y difusión de la cultura correspondientes a ese campo en la UCM.

## El primer documento maestro

De acuerdo con el rector, el grupo orientó su trabajo a elaborar el programa<sup>1</sup> de la *Maestría en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos* (MDNLYSC) y el resultado, aprobado por las instancias competentes, fue el “documento maestro” sobre cuya base se iniciaron las actividades docentes de este posgrado en abril de 2003.

Los autores de la primera versión de ese programa fueron las siguientes personas<sup>2</sup>:

- Doctor Germinal Cocho Gil. Física, Princeton. Biología teórica y sistemas complejos. Instituto de Física de la UNAM.
- Maestro en Ciencias José Luis Gutiérrez Sánchez. Ciencias de la Computación, Cantabria. Biología matemática, sistemas complejos, filosofía

---

<sup>1</sup>Véase [8].

<sup>2</sup>Tanto en ésta como en las otras listas de esta presentación, los datos de cada persona son: el campo de formación profesional, la institución en la que obtuvo el grado, las áreas de interés académico y el lugar de adscripción.

de la ciencia. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.

- Doctor Gustavo Martínez Mekler. Física, Manchester. Sistemas complejos, sistemas extendidos. Centro de Ciencias Físicas de la UNAM.
- Maestro en Ciencias Juan Luis Martínez Ledesma. Física, UNAM. Física matemática. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Doctor Luis Medrano González. Biología, UNAM. Genética de poblaciones, biología matemática. Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la UNAM.
- Doctor Octavio Miramontes Vidal. Biología Teórica, Imperial College. Sistemas complejos, redes libres de escala. Instituto de Física de la UNAM.
- Doctor Pedro Miramontes Vidal. Matemáticas, UNAM. Biología teórica. Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias de la UNAM.
- Doctor Pablo Padilla Longoria. Matemáticas, Courant, Nueva York. Biología matemática, ecuaciones diferenciales parciales. Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Sistemas de la UNAM.
- Doctor Faustino Sánchez Garduño. Matemáticas, Oxford. Biología matemática, ecuaciones de reacción-difusión. Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Por las características interdisciplinarias, el colectivo o Academia de profesores-investigadores responsables de echar a andar el programa de la MDNLySC se integró al Colegio de Ciencias y Humanidades (CCyH), uno de los tres en que la UACM se ha organizado para el cumplimiento de sus tareas<sup>3</sup>.

## La segunda versión del documento maestro

Sobre la base del original, la Academia de MDNLySC ha reelaborado el programa y en este trabajo han participado –además de Germinal Cocho, José

---

<sup>3</sup>Los otros dos son el Colegio de Ciencia y Tecnología (CCyT) y el Colegio de Humanidades y Ciencias Sociales (CHyCS).

Luis Gutiérrez, Juan Luis Martínez, Pedro Miramontes y Faustino Sánchez—las siguientes personas:

- Maestra en Filosofía Maruxa Armijo Canto. Filosofía de la Ciencia UNAM. Historia y filosofía de la ciencia. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Maestro en Ciencias Jorge Fernando Camacho Pérez. Física, UNAM. Sistemas dinámicos, procesos estocásticos y física de procesos irreversibles. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Doctor Felipe Humberto Contreras Alcalá. Ciencias de la Computación, Ottawa. Geometría computacional y tráfico. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Doctor Arezky Hernández Rodríguez. Física, La Habana. Análisis teórico-computacional de sistemas de muchos cuerpos. Academia de Matemáticas del CCyT de la UACM.
- Doctor Carlos Islas Moreno. Matemáticas, UNAM. Topología general y sistemas dinámicos. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Doctor en Filosofía John Kendell Graham. Lingüística, Saint Louis. Historia y filosofía de la ciencia. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Doctor José Antonio Neme Castillo. Ciencias de la Computación, UNAM. Redes neuronales, dinámicas multiagente. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Doctor Fernando Ramírez Alatríste. Física, UNAM. Sistemas complejos, dinámica multiagente. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.

Además de las personas de las listas anteriores, pertenecen a la Academia o colaboran con ella las siguientes y sus contribuciones están implícitas en esta versión del documento maestro:

- Doctor Rafael Barrio Paredes. Física, Oxford. Sistemas complejos. Instituto de Física de la UNAM.
- Doctor Denis Boyer. Física, París. Sistemas complejos. Instituto de Física de la UNAM.
- Doctor Luis de la Peña. Física, Moscú. Mecánica cuántica. Instituto de Física de la UNAM.
- Doctor Damián Hernández Herrán. Física, UNAM. Sistemas complejos, dinámica de poblaciones. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.
- Doctor Ricardo Mansilla Corona. Matemáticas, La Habana. Econofísica, sistemas complejos. Centro de Estudios e Investigación Interdisciplinaria en Ciencias y Humanidades.
- Doctor Juan Antonio Nido Valencia. Matemáticas, Louisiana State. Álgebra y teoría de conjuntos; álgebras evolutivas. Academia de Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la UACM.

## Estructura de este documento

Este documento consta de tres partes más apéndices: I la fundamentación del programa de la Maestría; II el programa y III el contenido temático de cada una de las asignaturas del plan de estudios. Los apéndices son los temarios de los cursos propedéuticos.

En la primera, los fundamentos se establecen sobre la base de la propuesta educativa del proyecto de la UACM y de una cosmovisión construida desde los sistemas complejos (capítulos 1 y 2).

En la segunda parte, se plantean los propósitos generales del programa (capítulo 3); se presenta el mapa curricular<sup>4</sup> (capítulo 4) y se informa de las líneas de investigación (capítulo 5) en torno a las cuales los estudiantes podrán desarrollar su trabajo de tesis.

Finalmente, en la tercera parte se presentan los objetivos de aprendizaje de las líneas curriculares, los temarios por asignatura y la bibliografía correspondiente (capítulos 6, 7 y 8).

---

<sup>4</sup>Reestructuración del plan original con el doble propósito de reducir en un semestre su duración y de articular mejor las tres líneas curriculares

# Parte I

## Fundamentación



# Capítulo 1

## Los objetivos de la UACM

En primera instancia, es preciso referir la fundamentación de este programa a los propósitos institucionales descritos en la “Exposición de motivos” de la *Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México* que constituyen la base de su proyecto educativo. En ella se manifiesta el propósito de ejercer la autonomía para servir a la gente e identifica esto con la garantía de que la comunidad académica pueda reflexionar sobre la realidad de manera crítica, analítica e inteligente para generar conocimientos y referentes de pensamiento científico y humanístico que contribuyan al desarrollo de la sociedad (*Cfr.* [3], p. 6).

Lograr lo anterior implica superar la tendencia de aproximarse a los problemas desde perspectivas estrechamente disciplinarias; en relación con esto, la *Ley* refiere que desde sus orígenes, la idea de la universidad (*Cfr.* [3], pp. 7 y 8) se ha nutrido por la aspiración de comprender la realidad y esto implica reconocerla como unidad y empeñarse en unir lo diverso.

Así, las instituciones universitarias son espacios donde se busca “fundir la diversidad con la unidad” y han producido “enormes avances tanto en la ciencia como en las humanidades” (véase *Idem*). Empero:

Contraria a esta aspiración de unir lo diverso es la tendencia a separar, a especializar, a disgregar. Esta tendencia ha aportado, igualmente, resultados útiles en el campo del conocimiento y la cultura, sin embargo también ha evidenciado sus debilidades. Una de ellas es la tendencia de los especialistas a ignorar o minusvaluar todo aquello que no pertenece a la especialidad propia, y a desarrollar la incapacidad de comprender no sólo otros campos

de especialización, sino también la necesaria interdependencia y unidad de todos los campos de conocimiento. Como resultado de estas actitudes, el especialista tiende a otorgar un valor absoluto a sus conocimientos especializados e, incluso, a pretender abarcar con sus conocimientos parciales la realidad total. Esto es lo que se ha denominado especialismo, y que hace décadas fue señalado por Ortega y Gasset como un grave peligro para la cultura y la humanidad.

Entonces, las aportaciones de los universitarios a la solución de los problemas de la gente deben resultar de un esfuerzo sostenido por “superar los límites de toda especialidad” de manera que los conocimientos especializados se integren “en planteamientos científicos y de amplia perspectiva cultural”. Por ello, el programa de la MDNLYSC se concibe como un espacio de formación en el cual es posible lograr la integración que demanda la *Ley* para contribuir a la solución de problemas específicos de nuestro tiempo y nuestra Ciudad.

## 1.1. El problema de los valores

La sabiduría y el conocimiento son productos sociales y forman parte de la riqueza del género humano; en la sociedad de nuestros días, tanto los saberes tradicionales como los avances científicos no son adecuadamente valorados y alimentan distintas formas de pensamiento mágico o se usan para la manipulación y el engaño. Los fundamentos de la ciencia –que permitirían discernir y juzgar lo que se presenta como verdadero– no están al alcance de todos y la ignorancia cubre como un velo espeso a mucha gente.

En particular, la ciencia ha sido un instrumento de liberación de los seres humanos contra la superstición y la ignorancia y, en muchos sentidos, sus avances han contribuido a mejorar la calidad de vida de la gente y la vocación de quienes se dedican a ella podría implicar un afán altruista. Sin embargo, la tradición en la que se suele formar a científicos y técnicos es, casi siempre, ajena a consideraciones éticas o políticas y el compromiso con la sociedad se relega o se pierde; además, en general, conforme los estudiosos se especializan, su visión del mundo se estrecha más y más.

En términos generales, el sistema de educación tradicional reproduce una visión fragmentaria del conocimiento, descontextualizada histórica y socialmente; además, en la educación superior hay una tendencia pragmática y

utilitaria que induce la especialización prematura o la maquila de profesionales adecuados para satisfacer necesidades del mercado de trabajo, obstaculiza la integración de conocimientos y, con ello, las posibilidades de reflexión acerca del papel que le corresponde a quien genera, aplica o reproduce el conocimiento en nuestra sociedad.

Todo esto implica actitudes y concepciones en la práctica profesional de quienes se han formado en ese sistema y es necesario tomarlas en cuenta para poder, en última instancia, evaluarlas críticamente porque, al cabo, pueden ser raíces de la indiferencia frente a las consecuencias éticas, políticas y sociales del propio trabajo.

La MDNLySC tiene el propósito de propiciar la educación de profesionales de la ciencia conscientes de los valores reproducidos en la formación que recibieron y de la posibilidad de superar las limitaciones asociadas con esos valores. Por esto, los planes de la Maestría integran el estudio de los sistemas dinámicos no lineales con el de los sistemas complejos y la temática de ciencia y sociedad (véase el capítulo 6) que se convierte en el articulador curricular del programa.

## 1.2. Obsolescencia y cambio rápido

Otro aspecto fundamental que ha de tomarse en cuenta en la perspectiva de formar científicos capaces de recuperar para la sociedad los beneficios de su trabajo, es el de la rapidez creciente con que se genera nuevo conocimiento.

En nuestros días, el cambio en todos los órdenes de la vida es más rápido que nunca antes; en lo relativo a aplicaciones del conocimiento hay una altísima tasa de obsolescencia –piénsese, por ejemplo, en la vida útil de un programa de computadora– mientras la cantidad de información disponible crece exponencialmente día a día y los nodos en la red electrónica mundial, espacio de difusión científica inimaginable hace cincuenta años, se multiplican con rapidez similar.

Según el científico británico C. H. Waddington<sup>1</sup>, hacia 1960 –en el proceso de cambio social cada vez más rápido que siguió a la Segunda Guerra Mundial– las revistas científicas publicaban casi un millón de artículos al año (*Cfr.* [13], p. 34) de manera que la información especializada es absolutamen-

---

<sup>1</sup>Conrad Hal Waddington (1905-1975), biólogo, paleontólogo, genetista, embriólogo y filósofo, fundador de la biología de sistemas fue precursor de la teoría de los sistemas complejos; en [13], una obra póstuma, establece alguna de sus características generales.

te inabarcable y es evidente que ningún ser humano puede apropiarse de tal cantidad de resultados con lo que se fortalece la tendencia a la fragmentación del conocimiento y la superespecialización.

Sin embargo, los avances tecnológicos de los últimos veinte años abren la posibilidad de aprovechar la red internacional de comunicación electrónica y el acceso generalizado a la información. Esto requiere una estrategia adecuada para contrarrestar la obsolescencia y saber estar al día a pesar de la aceleración, positiva y creciente, con la que el conocimiento “de punta” se va sustituyendo todos los días. El mismo Waddington proponía las siguientes medidas educativas para atender este problema (véase [13], p. 36-37):

[...] Presumiblemente, la solución consiste en: (a) enseñar principios generales que se hagan obsoletos sólo muy lentamente<sup>2</sup>; (b) enseñar métodos de investigación que permitan encontrar información factual actualizada, rápida y correctamente, para poner carne sobre la osamenta de los principios generales cuando sea necesario, a fin de (c) aplicar métodos de clasificación de la información que permitan categorizar y establecer jerarquías de manera que los asuntos importantes para un contexto particular puedan destacarse rápidamente y (d) inculcar el deseo de continuar autoeducándose luego de que el periodo de educación formal haya terminado.

En la MDNLYSC se trata de poner en práctica una educación basada en estos principios, apoyada en las facilidades de acceso y procesamiento de la información de nuestros días para que sus egresados puedan ser verdaderos agentes de transformación del mundo; conscientes de su papel como científicos humanistas, aptos para desarrollar y ejercer su capacidad creadora.

### 1.3. La interdisciplina

Desde la década de los setenta del siglo pasado, al tiempo que Waddington compendia las nuevas herramientas para el pensamiento, en México se trató de atender los problemas generados por la especialización prematura y la fragmentación del conocimiento con proyectos educativos innovadores co-

---

<sup>2</sup>Véase la sección 1.4, en la p. 18, *infra*.

mo el del Colegio de Ciencias y Humanidades<sup>3</sup> de la UNAM y el plan modular del Plantel Xochimilco de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-X). De manera sucinta, puede decirse que sus esfuerzos se orientaron primordialmente a tratar de construir ahí espacios de formación crítica e integradora y la evaluación de los resultados está fuera del alcance y los propósitos de este documento.

La construcción de espacios donde “fundir la diversidad en la unidad” requiere de un entramado práctico, conceptual, metodológico y cultural sobre el cual los futuros profesionistas desarrollen capacidades para la comunicación y el trabajo con especialistas de otras ramas; aumentar el caudal y la variedad de información que “se deposita en los estudiantes” o “se les enseña” en la escuela –información muchas veces fuera de contexto, sobre la base de creer que alguna vez les será útil según el modelo de la llamada “educación bancaria”– no propicia el desarrollo de esas capacidades. Si acaso, las tendencias dominantes en la educación superior en México siguen esta pauta y la brecha entre las ciencias naturales y las humanidades, por un lado y las ciencias sociales, en otro, no se ha cerrado mientras persisten las dificultades en la colaboración para atender problemas de interés común.

Entonces, importa superar la idea de que la educación es un proceso en el que la actividad fundamental es lo que enseñan los profesores o las instancias académicas institucionales y desplazar esa importancia a lo que se aprende. Esto implica enfocar la atención de los estudiantes y los profesores hacia sus propios procesos de construcción de conocimiento, desarrollo de capacidades y práctica de nuevas actitudes y habilidades. Así, además, se contribuye a evitar la dicotomía entre “quienes saben” y “quienes aprenden” para transitar hacia la identificación de alumnos y académicos como coprotagonistas de la acción de educar.

En la medida en que cada quien se descubre capaz de compartir lo aprendido, se da una mejor disposición y se tienen más herramientas para colaborar con los demás. Por el contrario, la interdisciplina por decreto es inútil y es contraproducente multiplicar las asignaturas o sobrecargar los contenidos temáticos del currículo.

Se trata, eso sí, de que los futuros profesionistas construyan correlaciones múltiples entre los más diversos campos de conocimiento y sus aplicaciones;

---

<sup>3</sup>En sus orígenes, el CCH de la UNAM trataba de lograr la integración a partir de propiciar que sus estudiantes se apropiaran de dos lenguajes –el de la matemática y el idioma español– y aplicaran dos métodos, el científico y el histórico-político.

de este modelo, centrado en el aprendizaje, la interdisciplina surgirá como una necesidad del que aprende y se vinculará directamente con el desarrollo de sus capacidades de investigación y solución de problemas.

En el plan de estudios de la MDNLYSC se manifiesta esta visión de la interdisciplina y se ha tratado de poner un énfasis especial para evitar cualquier oposición entre ciencias naturales, ciencias sociales o disciplinas humanísticas.

## 1.4. El cambio lento

Si bien la pronta obsolescencia de la información es una característica de nuestra época, las habilidades básicas y los principios generales necesarios para investigar y aprender a plantear y resolver problemas cambian a un ritmo mucho más lento.

Por ejemplo, al menos desde el siglo III a. de C. en que Euclides recopiló la geometría de la Grecia Clásica, Babilonia y Egipto en *Los elementos* y la plasmó en términos del método axiomático, la matemática ha crecido sobre el mismo modelo de razonamiento; sus múltiples e impresionantes ramificaciones siguen validándose mediante la pauta trazada hace casi veinticinco siglos y el conocimiento matemático acumulado desde entonces es robusto: la veracidad de sus teoremas no está sujeta al descubrimiento de las propiedades de la materia y nuestra comprensión del mundo –inspiradora quizá de formas nuevas de pensar la realidad y, por ello, generadora de insospechadas formas de crear o descubrir nueva matemática– tampoco influye en el método axiomático con el que se formalizan sus resultados.

Asimismo, esos principios generales en las ciencias físicas están esencialmente relacionados con la capacidad de aplicar la matemática para descubrir estructuras y patrones geométricos, temporales, dinámicos, relacionales, etcétera, en los más diversos ámbitos y esas habilidades –las mismas desde la Ilustración hasta nuestros días– constituyen una parte robusta en el cuerpo de conocimiento y es imprescindible atenderlas en cualquier programa de formación científica.

Del resto, de los resultados de la investigación de punta o de la inmensa cantidad de datos acumulados, lo que no puede excusarse es el aprender a valorar la información disponible en función de la posibilidad de generar conocimiento nuevo.

De lo anterior, puede decirse que la producción científica es un proceso

social en el que ocurren cambios cualitativos en diferentes escalas de tiempo. En la MDNlySC se trata de propiciar que los profesionales que se formen en ella, hagan suyos métodos, principios y técnicas que les permitan lidiar con las dificultades de una actividad con tal dinámica.



# Capítulo 2

## Una cosmovisión

La teoría de los sistemas complejos implica cambios en la visión del mundo respecto de la imagen dominante en las ciencias naturales hasta el último tercio del siglo XX.

En buena medida, las limitaciones de la educación científica tradicional descritas en la sección 1.1 son consecuencias de una visión del mundo en la que para conocer, se descompone lo que se estudia en elementos más y más simples y, luego, se buscan explicaciones sobre el comportamiento del todo tratando de agregar o sumar el de las partes bajo el supuesto de que los efectos son proporcionales a las causas y éstas son aditivas; es decir, una perspectiva donde el todo se reduce a las partes y los efectos de las componentes causales son lineales.

Éste ha sido un método particularmente exitoso en buena parte de las ciencias de la naturaleza pero no alcanza para dar explicaciones convincentes ni aun plausibles en procesos en los que el todo no es la resultante lineal de sus partes y en los que precisamente lo que importa es comprender el todo; estos procesos son ubicuos en cualquiera de los niveles de organización de la materia viva: desde lo molecular hasta lo social y lo mismo en la escala de lo orgánico que en la de manifestaciones del espíritu humano como la cognición, la conciencia, la cultura o el arte.

La irreducibilidad y el comportamiento esencialmente no lineal de la vida provee nueva luz para leer a Kant (1724-1804) cuando, en la *Crítica del juicio* (Cfr. [10], §LXXV), dice que no ha nacido el Newton que pueda explicar una sola brizna de hierba pues es imposible conocer a los “seres organizados y su posibilidad interior” sobre la base de principios puramente mecánicos.

## 2.1. La revolución científica

La crítica kantiana destaca las limitaciones del método de la mecánica clásica, la física de ese tiempo<sup>1</sup>, fruto maduro de la doctrina filosófica del racionalismo –que considera la realidad como gobernada por leyes inteligibles a las que la razón puede acceder–, de la actitud ante la vida asociada con ésta a lo largo del Siglo de las Luces y de la vertiente artística y cultural de la Ilustración y tenía un enorme prestigio respaldado, a finales del XVIII, por su capacidad predictiva, sus impresionantes avances para construir una visión unificada de la física de los cielos con la de la tierra y, notablemente, por la robustez y fecundidad de sus representaciones matemáticas.

Al hacer de la matemática el lenguaje de la física, Galileo le dio a la revolución racionalista su más poderosa arma y su mayor impulso. A partir de una serie de postulados simplificadores –entre los cuales, muchas veces, destaca el no tomar en cuenta los factores no lineales que están siempre presentes en la naturaleza– la física clásica justificó la idea de un Universo en armonía, en el que, como habían postulado los pitagóricos hacía casi dos mil quinientos años, se ejecutaba una verdadera “música de las esferas” y donde los cuerpos celestes se movían como las piezas de un inmenso reloj.

Una consecuencia de restringirse al estudio de lo lineal es la validez del principio de superposición según el cual es posible descomponer un problema en dos o más subproblemas más sencillos de tal manera que el problema original se obtiene como “superposición” o “suma” de estos subproblemas más sencillos. Sólo en un modelo lineal “el todo es igual a la suma de las partes” y sólo ahí el estudio de un sistema se puede reducir al de sus componentes por separado; ésta ha sido la forma de entender el mundo que ha dominado ampliamente el pensamiento científico hasta nuestros días<sup>2</sup>.

Como se ha dicho, esta concepción ha resultado un instrumento adecuado para lograr avances notables en muchos ámbitos; la biología molecular es, tal vez, uno de los campos de aplicación más logrados. Es cierto que, en algunos casos, propiedades colectivas pueden entenderse como resultantes de alguna combinación lineal de sus componentes pero, en general, el problema radica en que el reduccionismo no provee un método para ir de las partes a la totalidad. Por referirnos a un caso muy reciente, el conocimiento detallado

---

<sup>1</sup>Llamada “newtoniana” por simplicidad pero resultante de los esfuerzos de decenas de estudiosos, desde los precursores como Galileo, Torricelli y Descartes hasta Euler, Gauss y Laplace.

<sup>2</sup>Se dice de esta cosmovisión que es propia del mecanicismo reduccionista y lineal

de la secuencia de nucleótidos en el DNA de un ser viviente no permite explicar ninguna de las etapas de su desarrollo: esos componentes básicos vendrían a ser como el montón de ladrillos de la metáfora de Poincaré que, por sí mismos, sin estructura, no constituyen una casa<sup>3</sup>.

Así, a propósito de la publicación en febrero de 2001 de los resultados del proyecto de identificación del genoma humano, completamente insuficiente para explicar siquiera la síntesis de proteínas, el paleontólogo y evolucionista estadounidense Stephen Jay Gould reflexionaba ([7], p. 227):

... Desde los orígenes de su forma moderna, a finales del siglo diecisiete, la ciencia ha privilegiado fuertemente el modo reduccionista de pensamiento en el cual la complejidad se rompe en partes constituyentes para luego tratar de explicar el todo con base en las propiedades y las interacciones simples, completamente predecibles, de aquellas partes (análisis significa, literalmente, “separar en partes básicas”). El método reduccionista funciona triunfalmente para sistemas simples: por ejemplo, predice los eclipses o el movimiento de los planetas aunque no es capaz de predecir la historia de sus complejas superficies. Pero, ¿cuándo aprenderemos? Una vez más hemos pecado de soberbia al imaginar que basta tener la clave del comportamiento de algunos sistemas para tener la de todos los fenómenos naturales. ¿Aprenderá alguna vez Parsifal que sólo si es humilde y pone en juego estrategias de explicación múltiples podrá encontrar el Santo Grial?

A su vez, Phillip W. Anderson, Premio Nobel de física en 1977, ubica así el problema (*Cfr.* [2], p. 393):

La falacia principal en este tipo de pensamiento es que la hipótesis reduccionista no implica, en forma alguna, una hipótesis “construccionista”: la habilidad de reducir todo a leyes fundamentales simples no implica la habilidad de empezar desde esas leyes y reconstruir el universo. De hecho, entre más nos dicen los físicos de partículas respecto a la naturaleza de las leyes fundamentales,

---

<sup>3</sup>En *La ciencia y la hipótesis*, un texto de 1908, el matemático francés Henri Jules Poincaré (1854-1912) dice que la ciencia está construida con hechos tanto como lo está una casa con ladrillos pero que un conjunto de hechos no es una ciencia así como un montón de ladrillos no es una casa.

menos importancia parecen tener éstas con respecto a los problemas reales del resto de la ciencia y mucha menos con respecto a los de la sociedad.

Y, enseguida, atribuye esta insignificancia de las leyes fundamentales a la incapacidad del reduccionismo para tratar con dos dificultades gemelas: el tamaño o como suele llamarse técnicamente, “la escala” y la complejidad. A continuación, establece (*Cfr. Idem*):

[...] resulta que el comportamiento de los grandes (y complejos) conjuntos de partículas elementales no puede ser comprendido en términos de una extrapolación simple de las propiedades de unas cuantas partículas. En lugar de esto, en cada nivel de complejidad aparecen propiedades completamente nuevas y la comprensión de cada nuevo comportamiento requiere [...] una investigación desde los fundamentos como otra cualquiera.

Según Anderson, no es posible establecer una jerarquía de las ciencias según la cual las entidades elementales de la ciencia  $X$  obedecen las leyes de la ciencia  $Y$  (véase el cuadro 2.1) porque no es cierto que la ciencia  $X$  sea solamente la  $Y$  extendida a conglomerados más grandes o relaciones más complicadas. De hecho (*Cfr. Idem*):

[...] En cada etapa son necesarias nuevas leyes, conceptos y generalizaciones que demandan tanta inspiración y creatividad como en la anterior. La psicología no es biología aplicada ni la biología es química aplicada.

Si los intentos de lidiar en las ciencias físicas con las dificultades gemelas a las que se refiere Anderson –usando sólo la herramienta del reduccionismo mecanicista– están condenados al fracaso, tratar de aplicarla a describir o comprender procesos humanos –desde la conciencia de los individuos hasta la dinámica del mercado financiero, la historia o la evolución cultural de los pueblos– es un despropósito.

## 2.2. Los sistemas complejos

En sus orígenes, la mayor parte de la física se construyó con base en postulados simplificadores sin posibilidad de analogías válidas en un mundo característicamente no lineal. No hay, en todo el campo de las ciencias

<i>X</i>	<i>Y</i>
Física del estado sólido o de muchos cuerpos	Física de partículas elementales
Química	Física de muchos cuerpos
Biología molecular	Química
Biología celular	Biología molecular
⋮	⋮
Psicología	Fisiología
Ciencias sociales	Psicología

Cuadro 2.1: La imposible jerarquización de las ciencias bajo el supuesto de que la ciencia *X* pudiere reducirse a la ciencia *Y*.

sociales y las humanidades ni en gran parte del de las ciencias de la vida, un espacio en el cual se puedan construir representaciones significativas del comportamiento colectivo sobre las presunciones simplificadoras del reduccionismo. Hacerlo ha sido irresponsable y, muchas veces, catastrófico.

Por ello, las posibilidades de matematizar –esto es, de reconocer estructuras o patrones de comportamiento representables formalmente– procesos como la morfogénesis, el desarrollo o la evolución biológica, el crecimiento urbano, la evolución lingüística, la aparición de la conciencia en la vida de una persona o el aprendizaje, han de empezar por evitar el error de suponer que el comportamiento del todo es igual al de la suma de sus partes –y nótese: en todos estos procesos, el todo es lo importante– porque la totalidad no es una suma de células, seres humanos, palabras o neuronas: en ella se presentan actitudes y propiedades que emergen sólo en la acción colectiva y no tienen sentido individualmente.

El estudio de los fenómenos en los cuales importan la escala y la complejidad –por usar la descripción de Anderson– dio lugar al desarrollo de una nueva visión del mundo cuya comprensión requiere de herramientas adecuadas para representar no sólo mecanismos sino procesos; en la búsqueda de los instrumentos necesarios para esto es preciso tomar en cuenta que

- Incluso sistemas deterministas relativamente sencillos pueden ser esencialmente impredecibles; en ellos, pequeñas variaciones en las condiciones iniciales producen grandes diferencias en el estado final. El descubrimiento de este tipo de comportamiento dio lugar al concepto de caos

determinístico, uno de los más importantes de la ciencia contemporánea.

- El comportamiento individual de los agentes participantes puede ser tan heterogéneo que las aproximaciones al estudio del comportamiento colectivo mediante técnicas estadísticas es muy limitado o absolutamente inválido.
- Las interacciones son múltiples y no lineales y esto implica que los efectos no son proporcionales a las causas.

Asimismo, importa destacar que tales características son comunes a procesos cuya base material es muy distinta; por ejemplo, en

- la física de estructuras disipativas o sistemas abiertos, alejados del equilibrio termodinámico;
- la evolución biológica;
- la dinámica ecológica;
- la epigénesis del desarrollo orgánico;
- la economía del desarrollo regional;
- el intelecto, el aprendizaje, la capacidad creadora y la conciencia humanas;
- la historia de las sociedades humanas.

Reconocidas las limitaciones de la visión del mundo asociada con el mecanicismo lineal, reduccionista y estrechamente unidisciplinario en alcances y aplicaciones, se precisa establecer una teoría interdisciplinaria e integradora, cualitativa y dialéctica; capaz de trascender el estudio de “las partes” para convertirse en un aparato para estudiar “la integración de las partes” en la cual lo más importante sea comprender las propiedades emergentes; esto es, poder explicar cómo, en un sistema de elementos relativamente simples e indiferenciados, la interacción da lugar a un comportamiento colectivo distinto del que presentan por separado los elementos del sistema.

En la introducción del libro en el cual aborda estos temas en los ámbitos de la física, la química y la biología, el Profesor Hermann Haken<sup>4</sup>, pionero en el estudio de la emergencia de propiedades en fenómenos colectivos, dice ([9], p. VIII) :

Uno de los fenómenos más fascinantes y que más desafían a los científicos es la formación espontánea –desde las partículas germinales de cada organismo o, más aún, a partir del caos– de estructuras bien organizadas. Tales fenómenos son una experiencia cotidiana cuando observamos el desarrollo de las plantas y de los animales; al pensar en escalas de tiempo muy largas, los científicos se enfrentan al problema de la evolución y en última instancia al del origen de la materia viviente; cuando tratamos de explicar o comprender estos fenómenos biológicos extraordinariamente complejos, es natural preguntarse si se pueden encontrar procesos de autoorganización en sistemas más simples del mundo inanimado.

Esto requiere, en la terminología de C. H. Waddington, un nuevo instrumental para el pensamiento que nos permita construir el camino de regreso: de los componentes básicos al todo, al menos de un nivel de organización al inmediato superior pues no se trata, como ironizan Nigel Goldenfeld y Leo Kadanoff (véase [5], p. 88) de “explicar el funcionamiento de un tractor en términos de sus quarks”.

Ese instrumental está formado por las herramientas del análisis matemático de los sistemas dinámicos no lineales; con él se ha ido construyendo, desde hace cuarenta años, la *teoría de los sistemas complejos*.

Durante esos ocho lustros, el concepto central de la teoría ha sido descrito o caracterizado por distintos grupos de investigadores en el mundo. Se ha intentado definirlos formalmente pero aún no se ha logrado un acuerdo entre los especialistas; y aunque sigue habiendo sutiles pero importantes diferencias entre ellos<sup>5</sup>, Octavio Miramontes lo ha caracterizado así (véase [11], p. 84):

---

<sup>4</sup>Hermann Haken (Leipzig, 1927) es un físico teórico, investigador emérito de la Universidad de Stuttgart, fundador de la sinérgica “ciencia interdisciplinaria que explica la formación y autoorganización de patrones y estructuras en sistemas abiertos que operan lejos del equilibrio termodinámico” (véase “Synergetics” en la *Wikipedia*), base de la invención del rayo láser.

<sup>5</sup>La discusión excede el alcance de este documento pero han de hacerse evidentes en el

Los sistemas complejos están formados por un conjunto grande de componentes individuales que interactúan [...] y pueden modificar sus estados internos como producto de tales interacciones. Tales sistemas pueden ser estructuralmente simples, aunque tal simplicidad no impide que exhiban comportamientos dinámicos diversos y no triviales. Los sistemas complejos pueden situarse en regímenes críticos caracterizados por la presencia de fluctuaciones espaciales y temporales en todas las escalas posibles. Esta situación... puede alcanzarse de manera espontánea y sin la intervención de factores o fuerzas externas al sistema; [se dice entonces] que el proceso se ha autoorganizado. El proceso de interacciones puede generar comportamientos colectivos y globales. Es decir, conductas que no están definidas en los elementos individuales pero que emergen como un proceso colectivo y no pueden ser reducidas ni explicadas tomando aisladamente los elementos constituyentes.

### 2.3. La dinámica no lineal

Asimismo, los estudiosos han coincidido en el formalismo matemático idóneo utilizado para representar sistemas complejos. El mismo Haken observaba ([9], p.):

En años recientes han sido cada vez más evidentes numerosos ejemplos de sistemas físicos y químicos en que se originan estructuras espacio-temporales a partir de estados caóticos y que, como en los organismos, el funcionamiento de estos sistemas puede mantenerse mediante el flujo de energía y materia a través de ellos[...] Es sorprendente [...] que muchos de tales sistemas muestren parecidos notables en su comportamiento al pasar de un estado desordenado a otro ordenado. Esto sugiere fuertemente que el funcionamiento de tales sistemas obedece los mismos principios y que las concepciones y herramientas matemáticas que se tienen en la actualidad pudieran permitir explicar su comportamiento.

---

desarrollo de las líneas curriculares de ciencia y sociedad y de sistemas complejos (véanse, respectivamente, las secciones 6 y 8, *infra*).

El estudio de los sistemas dinámicos no lineales ha dado lugar a conceptos y herramientas nuevos. Como lo hemos visto, hoy se sabe que un sistema cuya evolución temporal está determinada por una dependencia funcional relativamente simple, puede presentar transiciones entre distintos estados y fluctuaciones en todas las escalas y, no obstante su impredecibilidad intrínseca, es posible hallar regularidades en el comportamiento del sistema que lo distinguen, sin duda alguna, del azar.

Más allá de los tecnicismos, importa destacar que las consecuencias epistemológicas de estos descubrimientos son dramáticas y alcanzan las más diversas esferas del pensamiento porque hay sistemas cuyos agentes pueden ser de naturaleza muy diversa y, sin embargo, evolucionar de manera semejante.

Dicho de otro modo: existen sistemas cuya base material microscópica es disímula (átomos, moléculas, amibas, insectos, neuronas, computadoras, etcétera) que, sin embargo, tienen manifestaciones macroscópicas semejantes (estructuras geométricas, redes, asociaciones, comportamientos colectivos, etcétera). Octavio Miramontes se ha referido a esto de la siguiente manera ([11], p. 84):

En la naturaleza existe un sinnúmero de ejemplos de sistemas complejos que van desde las reacciones químicas autocatalíticas hasta los procesos sociales y culturales. La naturaleza posee una fuerte tendencia a estructurarse en forma de entes discretos excitables que interactúan y se organizan en niveles jerárquicos de creciente complejidad; por ello, los sistemas complejos no son de ninguna manera casos raros ni curiosidades sino que dominan la estructura y función del universo. Constituyen la inmensa mayoría de los fenómenos observables y se manifiestan en ellos. Sin embargo, y aquí radica una de sus propiedades más interesantes, la abundancia y diversidad de los sistemas complejos [...] no implican una innumerable e inclasificable diversidad de conductas dinámicas diferentes. Todo lo contrario, los sistemas complejos poseen propiedades genéricas independientemente de los detalles específicos de cada sistema o de la base material del mismo.

Esto permite definir *clases de equivalencia dinámica* mediante la identificación de todos los sistemas que tienen el mismo comportamiento macroscópico aunque su naturaleza microscópica sea distinta. De esta manera, la dimensión de las posibles manifestaciones de la naturaleza es relativamente

pequeña porque, con base en leyes simples, es posible explicar multitud de comportamientos complejos.

El proceso de abstracción que permite identificar semejanzas entre muchas y muy variables cosas es uno de los principios organizadores sobre los cuales se construye el conocimiento; está en la base de las distintas representaciones del mundo que los seres humanos han elaborado y nos ha permitido superar el pasmo ante la diversidad.

El desarrollo de la teoría de sistemas dinámicos –cuyos cimientos fueron tendidos por Henri Poincaré a finales del siglo XIX– y el descubrimiento de grandes categorías de dinámicas universales, permite proponer una nueva concepción del mundo en la cual es posible descubrir, explicar y comprender el comportamiento de sistemas de muy diversa índole con las mismas herramientas matemáticas y el mismo aparato conceptual.

Por ejemplo, hacia 1971, el químico Ilya Prigogine, basado en sus investigaciones sobre sistemas termodinámicos abiertos o estructuras disipativas –caracterizadas por el intercambio permanente de materia y energía con su entorno y su no linealidad inherente– interpretó la vida como “una cascada de transiciones de unas estructuras disipativas en otras” e identificó a la teoría que había construido para el análisis fisicoquímico de aquellos sistemas como un instrumento para “cruzar la brecha que separa hoy en día la física de la biología” (*Cfr.* [12]).

Poco después, el mismo Prigogine y un notable grupo de biólogos y físicos en distintos centros académicos del mundo se animaron a tratar de cruzar aquella brecha y a transitar por la que se abre también entre la física y la sociología: las estructuras disipativas presentan cambios de fase y fluctuaciones características que se amplifican bajo ciertas condiciones cuyo estudio, nos dice Germinal Cocho (véase [4]):

[...] puede ser una herramienta importante para comprender los fenómenos de evolución y revolución social, así como el papel activo y consciente del hombre como promotor de esos cambios; en ese sentido, los fenómenos de transición que se esbozan tanto a nivel físico como en el análisis de la evolución de la estructura de la ciencia, podrían estar presentes en todos los niveles [...] Creemos que vale la pena añadir que el entendimiento de las leyes de evolución de la materia, a diversos niveles de los fenómenos de transición y amplificación de fluctuaciones, nos puede ayudar a comprender la dinámica de los cambios sociales revolucionarios

hacia una sociedad más justa, así como el papel del hombre como motor de estos cambios

Como se ve, hace más de treinta años, se descubrió que el camino inverso al reduccionismo, la teoría de sistemas complejos, nos permite extender, con una economía de medios semejante a la de la física tradicional, nuestra comprensión del mundo en muchas direcciones y abona la idea de que, por muy diversa que pueda ser la realidad, el conocimiento es uno solo y las distintas divisiones de la ciencia, convenciones simplificadoras arbitrarias y, muchas veces, engañosas.

Además, la teoría de sistemas complejos contribuye a acercar a las ciencias naturales con las disciplinas humanísticas y las ciencias sociales y esto es un servicio mayor a la cultura. Por ahora, el pensamiento dominante entre quienes hacen la ciencia sigue siendo reduccionista. Sin embargo, en las últimas tres décadas se ha confirmado que con las herramientas de los sistemas dinámicos no lineales es posible abordar y explicar aquellos problemas de formación de patrones en los sistemas complejos descritos arriba para los cuales la física tradicional es totalmente insuficiente. Si bien todavía no es posible saberlo de cierto, es posible que estemos viviendo un cambio de modelo científico, una revolución del pensamiento.

## 2.4. Consecuencias de esta cosmovisión

Dadas las condiciones de cambio rápido en la sociedad y de revolución en el pensamiento científico, ¿cuáles son las consecuencias en relación con la misión de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, empeñada en construir una visión universalista, profunda e integradora del conocimiento y en recuperar un sentido educativo de compromiso y servicio social?

En un artículo dedicado a la dinámica del conocimiento y la ignorancia, el físico británico Peter M. Allen<sup>6</sup>, (*Cfr.*[1], p. 3):

---

<sup>6</sup>Peter Allen es profesor de sistemas complejos evolutivos en la Cranfield School of Management; doctorado en física teórica, trabajó en sistemas autoorganizados con Ilya Prigogine en la Universidad Libre de Bruselas entre 1972 y 1987. Durante más de veinte años, Allen ha estado trabajando en la modelación matemática del cambio y la innovación en sistemas económicos, sociales, financieros y ecológicos. *Cfr.* la información en <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/45>.

El conocimiento ha dejado de ser lo que creíamos. Para saber cuáles serán las consecuencias de nuestras creencias, nuestra política y nuestras acciones, es necesario que podamos entender y predecir cómo funciona el mundo. Pero no podemos. Esto se debe a que somos parte de un sistema coevolutivo complejo con múltiples escalas espaciales y temporales de interacción en el cual, todo el tiempo, hay aprendizaje y hay transformación.

Se ha explicado en dónde se fincan los límites de nuestro conocimiento y porqué la teoría de los sistemas complejos es hoy, por hoy al menos, un instrumental para pensar esa realidad en movimiento perpetuo que, no obstante, presenta regularidades y patrones de comportamiento nunca absolutamente predecibles pero acotados e identificables como estados posibles hacia los cuales puede transitar el futuro.

En nuestros días, casi todos los centros de investigación científica del mundo tienen un grupo dedicado al estudio de los sistemas complejos. Por su influencia, destacan:

- El Instituto Internacional de Física y Química de la Universidad Libre de Bruselas, donde han desarrollado su trabajo Ilya Prigogine y su equipo.
- El Instituto de Investigación en Sistemas Complejos en Santa Fe de Nuevo México, Estados Unidos, en cuya fundación participó entre otros notables científicos, el mismo P. W. Anderson que hemos citado y en donde cada año los más destacados académicos de todo el mundo y de todas las disciplinas, como el biólogo teórico Stuart Kauffman o el economista Brian Arthur, investigan y dan conferencias o seminarios de actualización.
- El Departamento de Física Teórica de la Universidad de Stuttgart, Alemania, en donde la investigación en sistemas complejos ha sido liderada por el Profesor Hermann Haken.
- En México, desde principios de los setenta –inicialmente en la UNAM y con la orientación de Germinal Cocho– se formaron físicos, matemáticos y biólogos que, más adelante, fundaron grupos de trabajo interdisciplinario en la propia UNAM, la Maestría en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos MDNLYSC y el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3),

un proyecto interinstitucional en el que confluyen jóvenes de otras instituciones mexicanas de investigación y educación superior.

Con enfoques complementarios y algunas diferencias importantes en la interpretación, en todos se aplica la misma herramienta matemática, la teoría de los sistemas dinámicos no lineales, y sus estudios cubren prácticamente todo el espectro del conocimiento de nuestros días: desde astronomía, fisicoquímica, inmunología, fisiología del sistema nervioso central hasta evolución biológica, ecología, antropología cultural o prospección del desarrollo urbano.

La presencia de estos centros ha empezado a significar cambios en la educación superior y la Maestría en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México contribuye, al asumir las consecuencias educativas de la visión integral y dialéctica del mundo que hemos discutido, a esos cambios.



Parte II  
El programa



# Capítulo 3

## Objetivos generales y perfiles

Los objetivos generales de la MDNLySC son proporcionar a sus alumnos la posibilidad de

1. Formarse como profesionistas con la capacidad de
  - entender suficientemente el análisis matemático de los sistemas dinámicos no lineales para aplicarlo a la modelación de fenómenos y la solución de problemas;
  - identificar en la realidad las posibilidades de aplicar la teoría de los sistemas complejos para comprender procesos físicos, biológicos o sociales que tengan lugar en su ámbito de trabajo.
2. Apropiarse de una cultura científica y humanística que les permita
  - comunicarse adecuadamente con técnicos y profesionistas de distintos campos del conocimiento a fin de identificar la mejor forma de colaborar con ellos en la solución de problemas de interés común en los cuales puedan aplicarse las herramientas del análisis no lineal y la visión de la teoría de los sistemas complejos;
  - profundizar su educación ya sea formalmente o mediante el aprovechamiento de las múltiples fuentes de información disponibles hoy en el mundo;
  - construir un sistema de valores en el cual la búsqueda del bienestar y la felicidad de los seres humanos sea el más importante, para normar su actividad como científico.

3. Adquirir un compromiso con la sociedad para hacer que su práctica profesional contribuya a resolver los problemas de la gente, recuperando para ella el bien social que es la ciencia.

Los objetivos particulares de la MDNLySC en relación con la formación de sus egresados se describen en la sección 3.1.

### 3.1. El perfil del egresado

Los egresados de la Maestría en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México

1. Identificarán procesos representables como sistemas complejos en la naturaleza y la sociedad.
2. Reconocerán la necesidad de establecer un nivel adecuado de análisis para modelar los sistemas complejos.
3. Incorporarán a su cultura científica el conocimiento detallado de representaciones formales –mediante sistemas dinámicos no lineales (SDNL)– de procesos físicos, biológicos y sociales en los cuales se presentan fenómenos críticos.
4. Reconocerán que la producción científica, en particular la relacionada con las teorías de los SDNL y de los sistemas complejos, se da en contextos históricos específicos y tiene consecuencias en distintos ámbitos sociales.
5. Serán capaces de aplicar las herramientas de análisis de la teoría de los SDNL a la comprensión de los sistemas complejos.
6. Podrán establecer relaciones entre diversos campos del conocimiento, aprender a discriminar la información y conjeturar explicaciones coherentes en relación con fenómenos críticos de diversa índole para los cuales sea factible la modelación con las herramientas de la teoría de los SDNL.
7. Podrán participar en proyectos de investigación o de resolución de problemas interdisciplinarios en los cuales aplicarán la teoría de los SDNL.

8. Tendrán las bases matemáticas y científicas necesarias para proseguir su formación en dinámica no lineal y sistemas complejos (DNLySC) tanto formalmente –con estudios de doctorado o especialización donde los hubiere– como para mantenerse al día por cuenta propia.
9. Podrán transformar su práctica profesional en el ámbito que les corresponda al aplicar la visión integradora –científica, humanística y social– de la teoría de los SDNL y sus aplicaciones al análisis de los sistemas complejos.

## 3.2. El perfil de ingreso

### 3.2.1. Formación matemática

Quienes deseen ser alumnos de la MDNLySC deben poseer los conocimientos del currículo matemático de una licenciatura en ciencias o ingeniería. En particular, el correspondiente a los contenidos de las siguientes asignaturas:

1. Cálculo diferencial e integral de una y varias variables.
2. Álgebra superior y álgebra lineal.
3. Ecuaciones diferenciales ordinarias.
4. Fundamentos de análisis matemático.

Además, es recomendable tener conocimientos de algún lenguaje de programación, de métodos numéricos y de probabilidad y estadística. Asimismo, se requiere dominio suficiente del inglés para comprender sin dificultad textos científicos y académicos en ese idioma (desde artículos técnicos hasta ensayos filosóficos).

### 3.2.2. Requisitos de ingreso

Quien aspire a ingresar como estudiante del programa de MDNLySC deberá

1. Ostentar el grado de licenciado en alguna disciplina científica, ingeniería o carrera universitaria afín.

2. Mostrar, mediante una evaluación diagnóstica, que posee los conocimientos matemáticos descritos en la sección 3.2.1 de este documento.
3. Presentar una carta en la que explique cuáles son los motivos por los cuales está interesado en ingresar.
4. Entrevistarse con un Comité de Ingreso, designado por la Academia de la MDNLySC.

En la entrevista, el Comité comunicará al candidato el resultado de la evaluación diagnóstica, le indicará cuáles fueron sus fortalezas y debilidades y si está apto para ingresar o qué plan de trabajo se le sugiere para lograr el perfil requerido. Dicho plan puede incluir la recomendación de cursar y aprobar uno o más de los cursos de apoyo<sup>1</sup> cuyos contenidos se dan en el apéndice A y que podrán ser ofrecidos por los profesores de la Maestría o de volver a presentar la evaluación diagnóstica, cuando el aspirante tenga los conocimientos necesarios para aprobarla.

### 3.3. Requisitos para obtener el grado

La Universidad Autónoma de la Ciudad de México otorgará el título de *Maestro en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos* a quienes posean los conocimientos establecidos en este plan de estudios, presenten y defiendan exitosamente una tesis de investigación en algún tema del catálogo de líneas de investigación (véase el capítulo 5) o en el que se establezca de común acuerdo entre el alumno y sus asesores, con el visto bueno de la Academia de la MDNLySC.

---

<sup>1</sup>Estos cursos tienen el propósito de contribuir a que el aspirante recuerde la matemática que se requiere para ingresar y, por ello, se ofrecerán sólo a estudiantes que tengan las bases necesarias y requieran, en todo caso, “desempolvarse” o repasar. No son propedéuticos.

# Capítulo 4

## El mapa curricular

Toda organización curricular implica y es expresión de una filosofía. En el caso del programa de la MDNlySC, es resultante de la concepción del proyecto educativo de la UACM y conlleva la cosmovisión de los sistemas complejos que se expusieron extensamente en los capítulos 1 y 2, respectivamente.

Es pertinente reiterar que el estudio de lo complejo ha dado lugar a la identificación de procesos en los cuales, independientemente de la base material, si las interacciones son las mismas, los sistemas tienen el mismo comportamiento; se dice entonces que existen clases de universalidad dinámica y esto permite abarcar aplicaciones en muy distintos campos o formas de organización de la materia con la misma herramienta; el aparato conceptual y teórico más desarrollado para hacerlo es el análisis matemático de los sistemas dinámicos no lineales y, con él, se trata de comprender fenómenos críticos reales en sistemas físicos, biológicos y sociales<sup>1</sup>.

Por lo anterior, aunque hay una separación por asignaturas en el plan de estudios de la MDNlySC existe, también, una trama entre todas ellas que les da unidad y coherencia y se urde en torno al concepto clave de criticalidad.

### 4.1. Las líneas curriculares

El mapa se ha organizado con base en tres grandes líneas curriculares: la de Ciencia y Sociedad (Cys), la de Sistemas Complejos (SC) y la de Dinámica no Lineal (DNL). En el cuadro 4.1 se muestra la programación semestral del mapa curricular, se describe sucintamente el contenido de cada asignatura y

---

<sup>1</sup>Véase, en particular, la cita de Herman Haken en la p. 28, *supra*.

en los capítulos 6, 8 y 7 se desglosan los contenidos temáticos de cada línea. Cada semestre tiene una duración de dieciséis semanas.

Sem	Asignaturas		
1ero	<p>CyS I Evol. histórica del concepto de complejidad 4.5 h/semana</p>	<p>SC I Criticalidad y sistemas excitables 6 h/semana</p>	<p>DNL II Sist. continuos: estabilidad. Sist. discretos: mapeos, fractales y caos. 6 h/semana</p>
2do	<p>CyS II Criticalidad en procesos de la vida y la sociedad 4.5 h/semana</p>	<p>SC II Redes, autómatas y agentes 6 h/semana</p>	<p>DNL II Sist. continuos Bifurcaciones y caos 6 h/semana</p>
3ero	<p>Taller de Complejidad Problemáticas de la Cd. de México 4.5 h/semana</p>	<p>Seminario de Investigación 3 h/semana</p>	<p>DNL III Sist. continuos Autoorganización espacio-temporal 4.5 h/semana</p>
4to	<p>Seminario de Tesis 3 h/semana</p>		

Cuadro 4.1: Mapa curricular: descripción de la programación semestral del plan de estudios, el contenido temático por asignatura y su carga horaria semanal.

Conviene insistir en las relaciones horizontales del mapa curricular: es cierto que hay una separación en líneas que se distinguen por el tipo de herramienta con la cual se construyen las representaciones formales de distintos procesos; es cierto también que hay una secuenciación didáctica orientada por el principio rector de construir el conocimiento por etapas en las cuales los alumnos tienen la oportunidad de asimilar contenidos nuevos, madurar intelectualmente y apropiarse de los elementos necesarios para comprender las etapas subsecuentes.

Sin embargo, no ha de perderse nunca de vista que el cuerpo de conocimientos –sus conceptos, teorías, herramientas y aplicaciones– es un todo indivisible. Por ello, cada tema del programa da lugar a un tratamiento múltiple y complementario en las diferentes líneas.

Lo anterior quiere decir, por un lado, que el estudio de los sistemas dinámicos ha puesto de manifiesto que el comportamiento de un sistema depende del modo de interacción entre sus componentes más que de los detalles de su composición y esto provee medios para estudiar fenómenos en donde la experimentación directa es imposible y en donde la tradición de la investigación se limitaba a conseguir, en el mejor de los casos, sólo descripciones.

Estudiar la dinámica de un sistema abstrae la base material de éste pero tal alienamiento no puede ser total porque son los detalles de la fenomenología y composición los que definen las formas de interacción. Describir llanamente distintos sistemas en diferentes niveles fenomenológicos, además de ser parte de cualquier cosmovisión, es básico para cualquier caracterización dinámica formal y, por ello mismo, para lograr habilidades mínimas de modelación.

Por eso, en todas las líneas hay una insistente presencia de discusiones multidisciplinarias que van desde la mecánica estadística hasta la evolución biológica y la gestión social lo que es congruente también con el objetivo de que los egresados puedan construir una cultura científica y humanística que sea la base para el trabajo con otros profesionistas.

Además de la gran cantidad de ejemplos de aplicación y de discusiones fenomenológicas que aparecen una y otra vez en las tres líneas –y que se trabajarán sistemáticamente en el Taller de Complejidad durante el tercer semestre–, hay dos líneas transversales que cruzan el mapa y que no aparecen explícitamente en el cuadro 4.1: las simulaciones computacionales y la solución numérica de sistemas de ecuaciones diferenciales.

Y si bien algunos de los temas correspondientes a estas líneas se discuten pertinentemente durante el desarrollo de cada asignatura, se parte de la premisa de que los estudiantes tienen la madurez suficiente para comprender conceptualmente y allegarse, por sí solos, lo que haya menester.

## 4.2. De la presentación de los temas

Importa plantear algunas recomendaciones generales sobre la orientación del plan de estudios y la forma de abordar los contenidos temáticos. Es preciso considerar la heterogeneidad de la formación profesional de los estudiantes y

tomar en cuenta que en todo el programa es fundamental aplicar la capacidad de modelar (representar matemáticamente) procesos no lineales en distintas escalas de organización de la materia.

En general, en la educación de licenciatura no se desarrolla aquella capacidad y las siguientes recomendaciones se plantean como un método posible para propiciar que los estudiantes lo consigan:

1. A lo largo de los cursos pero especialmente al inicio, los estudiantes deberán discutir problemas de distintas ramas del conocimiento (física, química, biología, ecología, economía, sociología, etcétera) con la característica común de que su representación matemática se establece en términos de sistemas dinámicos no lineales. Es fundamental poner de relieve cómo la fenomenología se recoge en los términos del modelo, cuáles son las consecuencias de la inclusión de los no lineales y en qué clases de universalidad dinámica pueden ubicarse los distintos procesos, independientemente de su base material.
2. Los formalismos deberán presentarse siempre en un contexto adecuado de manera que se vaya cimentando una cultura de lo complejo y de lo no lineal mediante el conocimiento de la influencia recíproca entre el desarrollo de los elementos de teoría de SDNL que se incluyen el plan de estudios y el descubrimiento y representación de fenómenos críticos y, más en general, de sistemas complejos de diversa índole. Esto significa integrar en los cursos el análisis de ejemplos de esta interrelación que son históricamente importantes y se convirtieron en iconos del cambio en la visión del mundo asociada con los sistemas complejos como
  - el análisis de la estabilidad del sistema gravitacional de los tres cuerpos de Poincaré;
  - la sensibilidad a las condiciones iniciales en el modelo determinista del estado del tiempo de Lorenz;
  - la dinámica muy complicada del sistema dinámico simple del mapeo logístico de May;
  - la caracterización de las estructuras disipativas como sistemas termodinámicos que operan lejos del equilibrio de Prigogine;
  - el modelo depredador-presa de Lotka-Volterra;

- el oscilador químico no lineal de la reacción química de Belousov-Zabotinsky;
  - la universalidad de la constante de Feigenbaum como indicador de la rapidez con la que se duplica el periodo en una familia de mapeos cuadráticos dependiente de un parámetro que tienden al caos.
3. A partir de la discusión de los temas del inciso anterior, con el enfoque descrito en el primero de esta lista, estudiantes y profesores deberán abordar la construcción de elementos teóricos, conceptos y técnicas formales de mayor generalidad: se trata de ir de lo concreto y específico a lo general y abstracto y de dar el paso para comprender que, siempre, matematizar es seguir un método de investigación que permite hallar pautas y regularidades.
  4. La formalización axiomática debe plantearse como un recurso indispensable de comunicación técnica, universalmente aceptado como el lenguaje en que deben publicarse los resultados pero que no sustituye –en el contexto de la formación pertinente a la MDNLySC– la función primordial de la matematización, consistente en descubrir patrones generales de forma, cantidad, cualidad y comportamiento que pueden hallarse tanto en el mundo físico como en el del pensamiento para lo que se echa mano de una multitud de recursos intelectuales cuya heurística incluye desde el razonamiento lógico deductivo hasta las asociaciones libres; estos recursos incluyen la capacidad de leer comunicaciones técnicas formales pero no se agotan ahí: en este sentido, es más importante comprender y criticar cómo se construyen los modelos, su contenido y significado, que poder discernir los laberintos de la demostración formal de un teorema.



# Capítulo 5

## Líneas de investigación

El espectro de aplicaciones del análisis no lineal y de la teoría de los sistemas complejos es muy extenso y cada vez más amplio. La definición del tema sobre el cual los estudiantes de la MDNLYSC deberán desarrollar investigación para elaborar su tesis de grado debe ocurrir cuando muy tarde hacia el final del segundo semestre aunque puede establecerse antes y ubicarse en cualquiera de los campos de conocimiento descritos en el plan de estudios de la Maestría.

Sin embargo, el sentido del Taller de Complejidad sobre las problemáticas de la Ciudad de México del tercer semestre (véase el cuadro 4.1 de la página 42) es inducir el trabajo de investigación hacia la búsqueda de soluciones de problemas específicos de nuestra urbe. Este taller, además, es un espacio para construir proyectos comunes con instancias gubernamentales, organizaciones civiles o programas de licenciatura y posgrado de la UACM de manera que su experiencia de campo –en promoción de la salud, energía, ingeniería del transporte o educación ambiental, por ejemplo– permita establecer búsquedas pertinentes, multi e interdisciplinarias por su propia naturaleza.

Se describen enseguida las líneas de investigación en las que trabajan tanto los miembros de la Academia como los colaboradores de otras instancias de la UACM y de la UNAM.

1. Sociocomplejidad y simulación computacional de dinámicas sociales.
2. Dinámica de la economía y los mercados financieros.
3. Aplicaciones de la teoría de los sistemas complejos a la organización de los servicios públicos y la solución de problemas urbanos (salud, red

hidráulica, vialidad y transporte, etcétera).

4. Morfogénesis y evolución biológicas;
5. biología teórica.
6. Genómica computacional y reconocimiento de patrones.
7. Dinámica de medios excitables.
8. Epidemiología, inmunología y ecología matemáticas.
9. Modelos basados en agentes y cómputo neuronal
10. Modelos matemáticos de la evolución de genes y proteínas.
11. Máquinas moleculares biológicas.
12. Medioambiente y complejidad.
13. Cómputo emergente y redes complejas.
14. Dinámica de sistemas excitables

# Parte III

## Contenidos



# Capítulo 6

## Ciencia y sociedad

Nos encontramos en un mundo en crisis en el que las diferencias de nivel de vida entre países ricos y pobres y entre las clases sociales dentro de cada país aumentan dramáticamente y donde los conflictos sociales han rebasado los límites en que solían darse durante el siglo pasado para manifestarse ahora en el alza de los niveles de delincuencia, la merma de servicios públicos indispensables para el bienestar de la población como los de educación y salud y el control transnacional impuesto mediante la globalización de la economía por el complejo político-tecnológico-financiero-militar<sup>1</sup> que domina el mundo sin contrapesos desde la caída del socialismo real.

En esta situación importa discutir el papel de la ciencia y del quehacer de los científicos: quién les paga, a quién sirven, quién se beneficia de sus resultados y cómo y dónde se definen sus prioridades y orientaciones. Importa hacerlo porque este tipo de reflexiones –generalmente ausentes en la formación profesional de la mayoría de las carreras técnicas y científicas– son necesarias para que quienes se forman en la MDNLYSC tengan elementos de evaluación de los juicios que, sobre todo después de la Segunda Guerra Mundial, señalaron a los científicos como integrados en distintos niveles a los aparatos de dominación del capitalismo y, a la ciencia misma, como sometida a los intereses del lucro y la opresión.

Buena parte de estos señalamientos son válidos pero no lo es menos que para llegar a un mundo más justo, en el cual la gente sea feliz y tenga posibilidad de ser más creativa, la ciencia es indispensable y aunque la que nos corresponde desarrollar debe integrar los saberes y el conocimiento univer-

---

<sup>1</sup>Al que se refiere extensamente Pablo González Casanova en [6].

sales, para cumplir con los propósitos que se han discutido en los capítulos 1 y 2 de este documento, es preciso reconocer cómo el contexto histórico ha determinado los intereses y valores de la producción científica, hacer la crítica correspondiente, evitar los que sean ajenos a o contrapuestos con aquellos propósitos y fortalecer los que les sean propicios.

Hace falta, entonces, comprender a la ciencia de nuestros días como resultado de un proceso dialéctico: por un lado, patrocinado por aquel complejo político-tecnológico-financiero-militar que domina la economía mundial cuyas tendencias hegemónicas se determinan en los centros metropolitanos y, por otro, proveedor de herramientas para pensar y transformar el mundo hacia un futuro diferente y desde una dirección distinta.

En el contexto de la formación que se quiere propiciar mediante este plan de estudios, la línea curricular de Ciencia y Sociedad es un eje articulador; se trata de estudiar sus contenidos desde la perspectiva de la teoría de los sistemas complejos porque arroja nueva luz sobre la ciencia como un proceso, sugiere cómo puede ser la dinámica del mundo que ha producido saberes y conocimientos –desde la Antigüedad Clásica hasta nuestros días– y hace posible identificar los artefactos que la visión lineal había impuesto para la interpretación de esa dinámica, elaborar la crítica correspondiente y sugerir formas de representar y comprender los procesos sociales posiblemente más cercanas a la naturaleza de los mismos.

De hecho, el concepto de la teoría de los sistemas complejos clave para la construcción de estas representaciones es que la dinámica de las distintas manifestaciones de la vida en todos sus niveles y escalas de organización –desde las arqueobacterias hasta los seres humanos y desde los procesos metabólicos intracelulares hasta el comportamiento social<sup>2</sup>– tiende de manera autónoma, generada endógenamente por las interacciones de los componentes de cada sistema, a operar en una “zona crítica”, una región del espacio de configuraciones del sistema en el que se optimiza la capacidad de adaptarse, aprender resolver problemas o evolucionar; se dice que los sistemas complejos “se autoorganizan hacia esa zona” y esta propiedad suele citarse en la literatura como “criticalidad autoorganizada” (SOC por su sigla en inglés, correspondiente a *Self Organized Criticality*).

Así, en esta línea curricular se aborda el estudio de las relaciones entre ciencia y sociedad con esa perspectiva; se las ubica como componentes de

---

<sup>2</sup>En particular el comportamiento social de los seres humanos donde se incluye la dinámica económica, política y cultural.

sistemas cuyas interacciones han generado distintas visiones del mundo y que, en un proceso inacabable de influencias recíprocas, han condicionado las formas en que los seres humanos se conciben a sí mismos y producen nuevos saberes y conocimientos.

La línea se desarrolla en dos cursos semestrales con dinámica de seminario (Ciencia y Sociedad I y II) y en el Taller de Complejidad al que nos hemos referido sucintamente en el capítulo 5 (p. 47, *supra*) y cuyo temario se presenta en la sección 6.3 en (p. 57 y ss. *infra*).

Los temarios de los dos cursos iniciales implican también una puesta al día en el desarrollo de las ciencias naturales de nuestro tiempo; en particular, debe preverse el dedicar una cuarta parte de las sesiones de trabajo (cuatro por semestre) a la presentación de temas de la física y la biología del siglo XXI.

Por otro lado, aunque los temarios parecen extensos, cada uno consta de dos grandes apartados<sup>3</sup> concebidos para motivar la discusión y la búsqueda más que para ser expuestos en las sesiones de trabajo del seminario: una vez planteados los aspectos genéricos de cada tema, los subtemas indicados con asterisco (\*) deberán ser investigados y expuestos por los estudiantes como parte de las actividades necesarias para obtener el certificado de cada asignatura.

## 6.1. Temario de Ciencia y Sociedad I

En el primer semestre se revisa la evolución histórica de “lo simple” y “lo complejo” desde los filósofos presocráticos hasta nuestros días. Para comprender esto como proceso dentro de la historia social de la ciencia, se considera la dinámica de la Revolución Científica de los siglos XVI a XVIII en relación con la Revolución Francesa y sus consecuencias; a partir de aquí se trata de explicar la transición que lleva de la visión del mundo de la Ilustración a la del Romanticismo y se trata de identificar si hay una dinámica genérica que pudiere haber dado lugar, en diferentes momentos de la historia, a transiciones semejantes.

1. Evolución histórica de “lo simple” y “lo complejo” desde los presocráticos hasta nuestros días.

---

<sup>3</sup>Véanse los incisos 1 y 2 de la sección 6.1 y los incisos 1 y 2 de la sección 6.2, *infra*

- a) Lo simple y lo complejo en la comprensión de la materia.
  - 1) El cosmos de Aristóteles y el logos de Heráclito.
  - 2) Los universos de Newton y de Einstein; el determinismo laplaciano.
  - 3) Sistemas hamiltonianos y el caos en los cielos y el mundo cuántico.
  - 4) Sistemas conservativos, sistemas disipativos y la emergencia del orden.
- b) Lo simple y lo complejo en la comprensión de la vida.
  - 1) Entre Tales de Mileto y Charles Darwin.
  - 2) La termodinámica de Boltzmann y la evolución.
  - 3) Complejidad de los organismos: de von Bertalanffy a Stuart Kauffman.
  - 4) Complejidad y evolución.
  - 5) Complejidad ecológica.
  - 6) Las leyes de potencia de la vida, autoorganización hacia la zona crítica.
- c) (\*) Lo simple y lo complejo en la comprensión de la mente.
  - 1) Del espíritu de Platón al *l'homme machine* de Lammetrie.
  - 2) Complejidad en redes de neuronas: el modelo del procesamiento en paralelo.
  - 3) La complejidad de la dualidad mente-cerebro.
- d) (\*) Lo simple y lo complejo en la comprensión de la sociedad y la cultura.
  - 1) (\*) De la *polis* de Aristóteles al *Leviathan* de Hobbes.
  - 2) Complejidad social. La trampa hidráulica y la emergencia de la organización social.
  - 3) Complejidad cultural. El medioambiente, los tabúes y el pensamiento religioso.
- e) (\*) Lo simple y lo complejo en la comprensión de la economía.
  - 1) La economía de Adam Smith y el equilibrio del mercado.
  - 2) Caos y azar en la economía de mercado.

- 3) La teoría financiera de Bachelier.
  - 4) Complejidad del desarrollo regional.
2. Transiciones de fase en la historia de la ciencia.
- a) Del Siglo de las Luces al siglo XIX
    - 1) La Ilustración y La Revolución Científica.
    - 2) La Revolución Francesa.
    - 3) La primera industrialización y la reacción romántica: tendencias retrógradas y anterógradas.
  - b) (\*) De lo helénico a lo helenístico
    - 1) Los grandes sistemas filosóficos: Platón y la Academia; Aristóteles y el Liceo.
    - 2) El imperio de Alejandro y el mundo postalejandrino.
    - 3) Pérgamo y Alejandría: estoicos y epicureístas; la revolución olvidada.
  - c) (\*) De la Paz de Versalles a la invasión de Polonia
    - 1) La ciencia alemana de principios del siglo XX.
    - 2) La Primera Guerra Mundial y la Paz Armada.
    - 3) El romanticismo retrógrado y la base ideológica del nazismo.
  - d) (\*) De la Guerra Fría al mundo unipolar
    - 1) La Guerra de Vietnam y *Science for the People*.
    - 2) La teoría de los sistemas complejos.
    - 3) Relativismo, posmodernidad y movimiento *New Age*.

## 6.2. Temario de Ciencia y Sociedad II

En el segundo semestre se discuten fenómenos críticos en la naturaleza y la sociedad<sup>4</sup> y se trata de identificar lo genérico del comportamiento dinámico en zona crítica.

### 1. Transiciones críticas

---

<sup>4</sup>Hay aquí un enfoque complementario de la discusión técnica que se da en las líneas curriculares de sistemas complejos y de dinámica no lineal.

- a) La posibilidad de que existan diferentes estados estables. Algunos mecanismos
- b) Ciclos y caos.
- c) La emergencia de patrones en sistemas complejos.
- d) Fluctuaciones de todos los tamaños: heterogeneidad y diversidad.
- e) De la teoría a la realidad:
  - 1) Diferentes estados estables.
  - 2) Cuencas de atracción.
  - 3) Resiliencia.
  - 4) Capacidad adaptativa, inteligencia y aprendizaje.
  - 5) Transiciones críticas.

## 2. Estudios de caso

- a) La evolución biológica:
  - 1) La Conferencia de Princeton y la hegemonía de la síntesis neodarwiniana.
  - 2) Crítica científica de la ortodoxia neodarwiniana: el problema de los fenotipos faltantes, equilibrio puntuado y estructuralismo dinámico.
  - 3) La propuesta del “diseño inteligente” y la autoorganización evolutiva como una nueva visión del azar y la necesidad.
- b) Cambio socioeconómico-cultural
  - 1) Enigmas de la cultura como resultantes de la autoorganización socio-cultural hacia la zona crítica: vacas sagradas, porcofilia y porcofobia.
  - 2) La trampa hidráulica, el modo de producción asiático y la emergencia de las castas burocrático-administrativas.
  - 3) De la teoría de “la larga duración” de Fernand Braudel a la clío-dinámica o dinámica de la historia: alcances, esperanzas y limitaciones.
- c) (\*) El clima.
  - 1) Autoorganización hacia la zona crítica del sistema terrestre.

- 2) Usos y abusos de la hipótesis *Gaia*.
  - 3) Los ecosistemas terrestres.
- d) (\*) El programa *Evo-Devo*:
- 1) Hacia una biología teórica: el programa de Thom-Waddington.
  - 2) Implicaciones evolutivas del modelo morfogenético de Turing.
  - 3) Paisajes epigenéticos, redes booleanas, cuencas de atracción y diferenciación celular.
- e) (\*) Las revoluciones políticas y sociales
- 1) Fluctuaciones de todos los tamaños y “situación revolucionaria”.
  - 2) Tendencias retrógradas y anterógradas en la Revolución Bolchevique.
  - 3) El socialismo en un solo país y la caída del socialismo real.
- f) (\*) Cooperación y dinámica social
- 1) El dilema del prisionero y su reiteración.
  - 2) Vive y deja vivir: emergencia de la cooperación en la historia de la vida.
  - 3) Comunidades de aprendizaje y comunidades de práctica.

### 6.3. Taller de Complejidad

Este taller se concibe como un espacio de encuentro de representantes de organizaciones no gubernamentales y de la sociedad civil, funcionarios, profesionistas y académicos de distintos campos del conocimiento, interesados en las problemáticas de la Ciudad de México. En él se busca que los participantes apliquen las herramientas de análisis y representación de los sistemas complejos y generen búsquedas interdisciplinarias de solución de problemas específicos.

Se trata de que el taller produzca proyectos de investigación y de investigación-acción que, de inicio, integren contribuciones de participantes con distintas formaciones y en los que se aplique la visión y las herramientas de la teoría de los sistemas complejos. Estos proyectos podrán ser la base para la investigación a partir de la cual los estudiantes de la MDNLYSC elaboren

su tesis de grado y podrán, asimismo, ser presentados a las instancias civiles, académicas o gubernamentales pertinentes para su desarrollo y aplicación.

### **6.3.1. Problemas específicos de la Ciudad de México**

#### **Objetivos**

Los participantes

- Identificarán elementos de la dinámica de los procesos relacionados con cada problema y que pueden ser factores determinantes en su evolución.
- Con base en la identificación anterior, propondrán una jerarquización de los determinantes posibles según el peso que, desde su perspectiva, se le pueda atribuir a cada uno.

#### **Contenido temático**

1. Salud y alimentación;
2. Violencia y seguridad;
3. Sustentabilidad:
  - a) medioambiente: agua, energía y cambio climático;
  - b) transporte y tránsito vehicular;
  - c) crecimiento y planeación del desarrollo urbano.
4. Educación:
  - a) El sistema de educación pública;
  - b) La influencia de los medios masivos;
  - c) Experiencias alternativas;
  - d) Internet y redes.

### 6.3.2. Política organizativa

#### Objetivos

Los participantes

- Identificarán cómo han influyen los procesos de transformación de la materia, la energía, la información, el conocimiento y la política organizativa en la evolución de los problemas específicos de la Ciudad de México abordados en el módulo 6.3.1.
- Con base en la identificación anterior, plantearán qué tipo de participación ciudadana, de comunidades de ayuda, aprendizaje o práctica y de redes comunitarias podrían, desde su perspectiva, constituir factores capaces de influir en la dinámica de los problemas específicos de la Ciudad de México.

#### Contenido temático

1. Materia, energía, información, comunicación y política organizativa;
2. Participación ciudadana;
3. Comunidades de ayuda mutua, aprendizaje y práctica;
4. Redes comunitarias.

### 6.3.3. Herramientas de representación y análisis

Módulo teórico-práctico al que se dedicarán nueve sesiones de cuatro horas y media efectivas.

#### Objetivos

Los participantes

- Identificarán la complejidad como una característica que puede resultar de las interacciones no lineales de los componentes de un sistema que evoluciona, aprende o se adapta de manera autónoma y endógena y da lugar a propiedades globales del sistema que no están presentes en los agentes individuales y sólo surgen merced a la acción colectiva.

- Sobre la base de los objetivos correspondientes al módulo 6.3.1 y de la identificación anterior, plantearán hipótesis respecto a cómo emerge la complejidad en la dinámica de los problemas de la Ciudad de México.
- Aplicarán simuladores computacionales para representar numérica y geoméricamente *in silico* el comportamiento de sistemas dinámicos continuos o discretos; en particular, la evolución de redes complejas o de interacción multi-agentes.

### Contenido temático

1. Los sistemas como instrumentos para el pensamiento.
2. Herramientas matemáticas:
  - a) Sistemas dinámicos discretos;
  - b) Sistemas dinámicos continuos.
3. Introducción a los sistemas complejos:
  - a) Orden, azar y caos;
  - b) Sinergia y autoorganización;
  - c) Fenómenos críticos;
  - d) Propiedades emergentes en fenómenos colectivos.
4. Taller de introducción al uso de simuladores computacionales.

## 6.4. Bibliografía de la línea

1. Albert, Alain (Editor) (1995): *Chaos and Society*. Amsterdam, IOS Press.
2. Allen, Peter M. (1997): *Cities and Regions as Self-Organizing Systems. Models of Complexity*. Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers.
3. Altmann, Gabriel y Walter A. Koch, (Editores) (1998): *Systems, New Paradigms for the Human Sciences*. Berlín, De Gruyter.

4. (BB) Axelrod, Robert (1984): *The Evolution of Cooperation*. Nueva York, Basic Books.
5. Axelrod, Robert (1997): *The Complexity of Cooperation. Agent-based Models of Competition and Cooperation*. Chichester. Princeton University Press.
6. (BB) Berlin, Isaiah (2001): *The Roots of Romanticism* Princeton, Princeton University Press.
7. Bernal, John Desmond, (1973): *Historia social de la ciencia*. Barcelona. Península.
8. (BB) Bushev, Mikhail (1994): *Synergetics: Chaos, Order, Self-Organization*. Singapur, World Scientific.
9. (BB) Cocho, Germinal; P. Miramontes y J.L. Gutiérrez (2002) “Ciencia y humanismo. Capacidad creadora y enajenación” en <http://www.-mathmoo.unam.mx/biomat/pedro/pdf/portugal.pdf>
10. de la Peña, Luis (2007): “La interdisciplina como meta” en *La interdisciplina y las grandes teorías del mundo moderno*. (Julio Muñoz Rubio, Coordinador). México, CEIICH-UNAM. Colección Debate y Reflexión. pp. 253-277.
11. Diacu, Florin y Philip Holmes (1996): *Celestial Encounters. The Origins of Chaos and Stability*. Chichester, Princeton University Press.
12. Dussel, Enrique (2007): “El programa científico de investigación de Karl Marx (ciencia social funcional y crítica)” en *La interdisciplina y las grandes teorías del mundo moderno*. (Julio Muñoz Rubio, Coordinador). México, CEIICH-UNAM. Colección Debate y Reflexión. pp. 43-68.
13. Érdi, Péter (2008): *Complexity Explained*. Berlín, Springer Verlag.
14. (BB) Feyerabend, Paul Karl, (1989): *Contra el método: esquema de una teoría anarquista del conocimiento*. Barcelona. Ariel.
15. Gutiérrez Sánchez, José Luis (1999): “Teorías, sistemas y comprensión del mundo”, en *Perspectivas en las teorías de sistemas*. (Santiago Ramírez, Coordinador). (Colección Aprender a Aprender). México, CEIICH-UNAM-Siglo XXI. (pp. 93-100).

16. Gutiérrez Sánchez, José Luis (2000): “El sueño de Isaac Asimov o ¿son matematizables las ciencias de lo humano?”, en *Política y Cultura* **13**: 33–54, Matemáticas ante las ciencias sociales. Verano de 2000. México, Departamento de Política y Cultura, UAM-X.
17. Heilbron, J.L. (2000): *The Dilemmas of an Upright Man. Max Planck and the Fortunes of German Science*. Cambridge, Harvard University Press.
18. Holmes, Richard (2010): *The Age of Wonder. How the Romantic Generation Discovered the Beauty and Terror of Science*. Nueva York. Vintage Books.
19. Kauffman, Stuart (1995): *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. Nueva York, Oxford University Press.
20. Kauffman, Stuart (2000): *Investigations*. Nueva York, Oxford University Press.
21. (BB) Kuhn, Thomas, (1971): *La estructura de las revoluciones científicas*. México, Fondo de Cultura Económica.
22. Lévy Leblond, Jean Marc y Alain Jaubert (1980): *(Auto)crítica de la ciencia*. México, Nueva Imagen.
23. (BB) Mainzer, Klaus (1994): *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*. Berlín. Springer Verlag.
24. Matthies, M., H. Malchow y J. Kriz, (Editores) (2001): *Integrative Systems Approaches to Natural and Social Dynamics*. Berlín. Springer Verlag.
25. Mayr, Ernst W. y William B. Provine (1997): *The Evolutionary Synthesis*. Harvard. Harvard University Press.
26. (BB) Miramontes, Pedro; J.L. Gutiérrez y G. Cocho (2007): “La evolución biológica desde la perspectiva de la teoría de los sistemas complejos” en *La interdisciplina y las grandes teorías del mundo moderno*. (Julio Muñoz Rubio, Coordinador). México, CEIICH-UNAM. Colección Debate y Reflexión. pp. 151-180.

27. Mitchell, Melanie (2009): *Complexity. A Guided Tour*. Nueva York. Oxford University Press.
28. Morris, Richard (2001): *The Evolutionists. The Struggle for Darwin's Soul*. Nueva York. Henry Holt and Company.
29. Morowitz, Harold J. (2002): *The Emergence of Everything. How the World Became Complex*. Nueva York. Oxford University Press.
30. Richards, Robert J. (2002): *The Romantic Conception of Life. Science and Philosophy in the Age of Goethe*. Londres. The University of Chicago Press.
31. (BB) Rose, Steven y Hilary Rose (compiladores) (1979): *Economía política de la ciencia*. México, Nueva Imagen.
32. (BB) Rose, Steven y Hilary Rose (compiladores) (1979): *La radicalización de la ciencia*. México, Nueva Imagen.
33. (BB) Russo, Lucio (2004): *The Forgotten Revolution: How Science Was Born in 300 BC and Had to Be Reborn* (Levy, S., Traductor). Berlín, Springer Verlag.
34. (BB) Scheffer, Marten (2009): *Critical Transitions in Nature and Society*. Princeton, Princeton University Press.
35. Turchin, Peter et al. (Editores) (2006): *Historical Dynamics and Development of Complex Societies*. Moscú, URSS.
36. Turchin, Peter (2006): *War and Peace and War*. Nueva York, Plume.
37. von Bertalanffy, L; W.R. Ashby y G.M. Weinberg (1976): *Tendencias en la teoría general de sistemas*. Madrid, Alianza Universidad.
38. (BB) von Bertalanffy, Ludwig (1976): *Teoría general de los sistemas*. México, Fondo de Cultura Económica.
39. Volkenshtein M.V. (1981): *Biofísica*. Moscú. Mir.
40. (BB) Waddington, Conrad Hal (1977). *Tools for Thought. How to Understand and Apply the Latest Scientific Techniques of Problem Solving*. Nueva York. Basic Books Inc. Publishers.



# Capítulo 7

## Dinámica no lineal

El tratamiento actualizado de la teoría de los sistemas dinámicos implica ver la de los sistemas continuos a la par de la correspondiente a sistemas discretos; este propósito queda manifiesto en los temarios de los dos cursos de esta línea. El orden en que se presentan los temas de cada tipo de sistema es arbitrario aunque en algunos casos se ha optado por comenzar con los discretos porque el aparato conceptual y algorítmico que requieren permite acceder con mayor facilidad a la discusión de algunas temáticas como ocurre, en particular, con las de estabilidad y caos.

La extensión de los temarios requiere que se le asigne a cada uno una carga horaria de seis horas semanales en el aula durante las dieciséis semanas que dura el semestre y exige de los estudiantes una dedicación al menos equivalente a ese tiempo de trabajo individual. Por esto, a los estudiantes de tiempo parcial se les recomienda no llevar otra asignatura mientras cursan éstas.

Todos los cursos de este plan de estudios han de considerarse integrados unos con otros independientemente de la línea curricular a la que pertenezcan; la reiteración temática obedece, en todo caso, a las diferentes perspectivas con que se aborda. En particular, los temas correspondientes a medios excitables, autoorganización y formación de patrones que se discuten con ecuaciones diferenciales parciales en DNL III, son tratados en el curso de Sistemas Complejos II en el contexto de la dinámica de autómatas celulares y agentes.

Se incluye en este capítulo el temario del curso optativo de Dinámica no Lineal III y el extracurricular complementario de Procesos Estocásticos (véanse, respectivamente, las secciones 7.3 y 7.4, *infra*).

## 7.1. Temario de Dinámica no Lineal I

1. Introducción a la teoría de los sistemas dinámicos.
  - a) Modelación de fenómenos o procesos físicos, biológicos o sociales que dependen del tiempo bajo el supuesto de que éste varía en un continuo o a intervalos discretos.
  - b) Sistemas dinámicos continuos y discretos autónomos y no autónomos respecto del tiempo.
  - c) Sistemas discretos.
    - 1) Ecuaciones en diferencias.
    - 2) Análisis gráfico (diagramas de telaraña) y órbitas.
    - 3) Puntos fijos y periódicos.
  - d) Sistemas continuos.
    - 1) Sistemas de ecuaciones diferenciales.
    - 2) El problema de Cauchy y el concepto de flujo.
    - 3) Espacio fase y soluciones de equilibrio.
    - 4) Existencia y unicidad, sensibilidad y derivabilidad ante las condiciones iniciales y los parámetros de las soluciones.
2. Sistemas lineales.
  - a) Sistemas discretos.
    - 1) Ecuaciones en diferencias lineales homogéneas y no homogéneas.
    - 2) Solución general de mapeos lineales.
    - 3) Mapeos en el plano.
  - b) Sistemas continuos.
    - 1) Sistemas lineales homogéneos y no homogéneos.
    - 2) Sistemas con coeficientes constantes, diagonalización de la matriz de coeficientes  $A$  y formas canónicas o de Jordan.
    - 3) Sistemas lineales autónomos bidimensionales y tridimensionales.

## 3. Teoría de estabilidad y descripción global de trayectorias.

## a) Estabilidad.

## 1) Sistemas discretos.

*a'* Estabilidad de puntos fijos de mapeos.

*b'* Mapeos no lineales y matriz jacobiana.

*c'* Puntos fijos en mapeos bidimensionales: sumideros, fuentes y sillas.

## 2) Sistemas continuos.

*a'* Estabilidad de Lyapunov.

*b'* Sistemas lineales, linealización de sistemas no lineales y matriz jacobiana.

*c'* Equivalencia topológica local; teorema de Hartman-Grobman.

*d'* Función de Lyapunov.

## b) Descripción global de trayectorias en sistemas continuos.

## 1) Ceroclinas.

## 2) Primera integral, sistemas hamiltonianos y de gradiente.

## 3) Órbitas homoclínicas y heteroclínicas.

## 4) Teorema de Liouville.

## 4. Órbitas periódicas.

## a) Sistemas continuos.

## 1) Sistemas lineales no autónomos periódicos. Teoría de Floquet.

## 2) Órbitas periódicas en sistemas no lineales, ciclos límite y separatrices.

## 3) Criterio negativo de Bendixon y prueba de Dulac.

4) Conjuntos  $\alpha$  y  $\omega$  límite y teorema de Poincaré-Bendixon.

## 5) Sistemas de Lienard.

## 6) Métodos perturbativo y de promedio para la estimación de la amplitud y el periodo de las órbitas.

## b) Sistemas discretos.

- 1) Sección de Poincaré.
- 2) Cuasiperiodicidad.

## 7.2. Temario de Dinámica no Lineal II

### 1. Variedades invariantes.

#### a) Sistemas continuos.

- 1) Variedades, conjuntos invariantes y variedades invariantes.
- 2) Subespacios estable, inestable y central de sistemas lineales autónomos.
- 3) Variedades estable, inestable y central en puntos de equilibrio de sistemas no lineales autónomos.
- 4) Existencia y métodos de construcción de las variedades invariantes.
- 5) Formas normales.

#### b) Sistemas discretos.

- 1) Subespacios estable, inestable y central en mapeos lineales.
- 2) Variedades estable, inestable y central en puntos fijos de mapeos no lineales.
- 3) Variedades estable, inestable y central de órbitas periódicas.

### 2. Bifurcaciones.

#### a) Sistemas continuos.

##### 1) Bifurcaciones locales.

- a'* Bifurcaciones nodo-silla, pitchfork y transcítica. Teorema de Sotomayor.
- b'* La aparición de ciclos límite a través de bifurcaciones. Teorema de Poincaré-Andronov-Hopf.
- c'* Biestabilidad, multiestabilidad y el fenómeno de histéresis.

- d'* Codimensión de una bifurcación y desdoblamiento (unfolding).
- e'* Bifurcaciones de Takens-Bogdanov y de sistemas hamiltonianos.
- 2) Bifurcaciones globales de trayectorias.
  - a'* Bifurcaciones de trayectorias heteroclínicas (silla-silla, nodo-silla) y homoclínicas.
  - b'* Bifurcaciones en órbitas periódicas no hiperbólicas.
- 3) Estabilidad estructural, genericidad y transversalidad. Teorema de Peixoto.
- 4) Métodos perturbativo y de promedio para bifurcaciones locales, en órbitas periódicas, en sistemas hamiltonianos, etc.
- b)* Sistemas discretos.
  - 1) Bifurcaciones locales en mapeos: nodo-silla, pitchfork, transcítica y de Neimark-Sacker
  - 2) Codimensión de una bifurcación local en un mapeo.
  - 3) Bifurcaciones en mapeos bidimensionales.

### 3. Caos.

- a)* Sistemas discretos.
  - 1) Caos determinista.
    - a'* Sensibilidad a las condiciones iniciales, mezcla y puntos periódicos de mapeos unidimensionales (logístico, tienda, desplazamiento de Bernoulli, etc.).
    - b'* Exponentes de Lyapunov.
    - c'* Órbitas ergódicas e histogramas de mapeos unidimensionales.
  - 2) Orden y caos.
    - a'* Duplicidad de periodo. universalidad y constante de Feigenbaum.
    - b'* Teorema de Sharkovskii.
    - c'* Otras rutas al caos: cuasi-periodicidad, intermitencia y crisis.

- 3) Atractores extraños: los mapeo de de Henón.
  - 4) Dinámica simbólica y mapeo de herradura de Smale.
  - 5) Geometría del Caos: conjuntos de Julia y de Mandelbrot.
- b) Sistemas continuos.
- 1) Caracterización y medición del caos
    - a'* Sensibilidad a las condiciones iniciales.
    - b'* Espectro de Lyapunov, densidades invariantes, espectro de potencias y funciones de correlación.
  - 2) Sistemas hamiltonianos.
    - a'* Fundamentos de la mecánica de Hamilton, transformaciones canónicas y formas hamiltonianas normales.
    - b'* Sistemas integrables, cuasi integrables y separables, y el teorema de KAM.
  - 3) Algunos sistemas dinámicos tridimensionales
    - a'* Sistemas de Lorenz, Rössler, Chua, Hodking-Huxley, etcétera.
    - b'* Caos cuando  $n \geq 3$ .
  - 4) Osciladores no lineales forzados de Duffing y Van der Pol.
- c) Temas recientes en el análisis de dinámicas caóticas
- 1) Análisis de series de tiempo caóticas.
  - 2) Dispersión caótica.
  - 3) Control y sincronización del caos.
  - 4) Caos espacio-temporal y cuántico.

### 7.3. Temario de Dinámica no Lineal III

Este curso es optativo.

- 1. Autoorganización, morfogénesis y emergencia de patrones
  - a)* Estructuras disipativas y rompimientos de simetría.

- b)* Modelación de procesos difusivos. Ley de Fick<sup>1</sup>.
- c)* Los sistemas de reacción-difusión como mecanismo morfogénético.
- d)* Bifurcación de Turing. El sistema activador-inhibidor.
- e)* Otro mecanismo morfogénético: la quimiotaxis.
- f)* Morfogénesis y filotaxia.

## 2. Propagación de ondas en medios excitables

- a)* La neurona y las células cardiacas como sistemas excitables. Cualidades de los sistemas excitables. Sistemas biestables.
- b)* La propagación de ondas a través del músculo cardiaco.
- c)* Las ondas químicas en las reacciones de Belousov-Zabotinski. Osciladores espacio-temporales.
- d)* Propagación de ondas en dimensión uno, dos y tres. Ondas viajeras, espirales rotando, ondas enrolladas.
- e)* La geometría de las ondas en medios excitables.

## 3. Patrones y sistemas fuera del equilibrio.

# 7.4. Procesos Estocásticos

El estudio de cualquier fenómeno o proceso con las herramientas de los sistemas dinámicos no lineales en condiciones no idealizadas requiere considerar factores aleatorios que aparecen siempre de manera inmediata y natural. Se trata así de tomar en cuenta las fluctuaciones de carácter no determinista. Por otra parte, existen procesos de gran importancia que son, en sí, de naturaleza aleatoria.

Es por ello pertinente obtener una formación en esta área de los sistemas dinámicos, que incluya aspectos tanto analíticos y de modelación como asintóticos y numéricos. Si bien, por razones metodológicas, es recomendable discutirlos cuando los alumnos hayan adquirido ya las habilidades y la

---

<sup>1</sup>Deberá establecerse la relación con los temas de sistemas dinámicos intrínsecamente aleatorios (caminatas aleatorias) y de sistemas dinámicos aleatorios continuos (movimiento browniano y procesos de difusión) como se describen en 1*b* y 3 del temario del curso complementario de Procesos Estocásticos (véanse, en el apéndice 7.4, pp. 71 y ss.

comprensión básicas sobre sistemas dinámicos deterministas. Por otra parte, también en este contexto se puede revisar el manejo de datos estadísticos de series de tiempo y reforzar la discusión del tema 4 de Sistemas Complejos II (véase la sección 8.2).

Empero, nada de esto debe desvirtuar el hecho de que, en la práctica, el estudio de la dinámica no lineal comprende al sistema como un todo y en última instancia, es el problema que se trate el que debe determinar la metodología adecuada, y no al revés. El objetivo general es poder determinar si existen diferencias cualitativas en el desarrollo del sistema debido a los efectos de factores aleatorios.

1. Ejemplos y motivaciones.
  - a) Los sistemas dinámicos aleatorios (SDA) como sistemas dinámicos ya conocidos sujetos a perturbaciones aleatorias.
  - b) Sistemas dinámicos intrínsecamente aleatorios (caminatas aleatorias).
  - c) Problemas y preguntas importantes. Planteamiento de una teoría cualitativa y las diferencias y semejanzas con la correspondiente teoría para sistemas dinámicos deterministas.
2. SDA discretos: fundamentalmente cadenas de Markov.
3. SDA continuos: fundamentalmente movimiento browniano y algo de procesos de difusión: ecuaciones para la probabilidad de transición (Kolmogorov, Fokker-Planck).
4. Aspectos cualitativos
  - a) Recursividad, ergodicidad, etcétera.
  - b) Estabilidad (problemas de tiempos de residencia, escape, etcétera).
  - c) Bifurcación (transiciones inducidas por ruido).
5. Métodos asintóticos y numéricos
  - a) Límites de ruido de baja intensidad.

- b) Simulaciones y métodos numéricos (generación de números aleatorios, Montecarlo para evaluar algunos valores esperados de funcionales).
- c) Algunos métodos numéricos para la resolución de ecuaciones diferenciales estocásticas

## 7.5. Bibliografía de la línea

El enfoque interdisciplinario y la diversidad de problemas a través de los cuales se sugiere presentar los temas de estas asignaturas, imposibilita que pueda pensarse en “el libro de texto” para cada uno de los cursos que se propone. Así, no hay referencia alguna en la lista que sigue que incluya todos los temas de alguna de las tres asignaturas de la línea. Por eso, en cada referencia aparecen indicadores sobre el nivel (E, es introductorio; I, intermedio; y A, avanzado) del texto y el curso para el que se recomienda (1, corresponde a DNL-I; 2, a DNL-II, y 3, a DNL-III).

### 7.5.1. Sistemas deterministas

1. (BB) Arrowsmith D. K. y C. M. Place (1990): *Introduction to Applied Non-linear Dynamical Systems*, Cambridge University Press. (A,1,2).
2. Bazykin, A. D. (1998): *Nonlinear dynamics of interacting populations*. World Scientific (A,1,2).
3. Bak, Per (1996): *How Nature Works : the Science of Self-Organized Criticality*. Nueva York. Copernicus.
4. (BB) Esteva, Lourdes y Manuel Falconi (compiladores) (2002): *Biología matemática, un enfoque desde los sistemas dinámicos*. Coordinación de servicios editoriales, Facultad de Ciencias, UNAM (E,1,2,3).
5. (BB) Glass L. y M.C. Mackey (1988): *From clocks to chaos. The rhythms of life*. Princeton University Press. (I,1,2).
6. Grindrod, P. (1995): *Patterns and waves*, Oxford University Press.
7. Gray P. y S. K. Scott (1994): *Chemical oscillations and instabilities*, Clarendon Press, Oxford.

8. Guckenheimer, J. y P. Holmes (1983): *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields*, Springer Verlag. (A,1,2).
9. (BB) Gutiérrez Sánchez, J.L. y F. Sánchez Garduño (1998): *Matemáticas para las ciencias naturales*. Serie Aportaciones Matemáticas: **11**, Sociedad Matemática Mexicana. (E,1).
10. (BB) Hale, J. y H. Kocak (1991): *Dynamics and bifurcations*. Springer-Verlag. (I,1,2).
11. (BB) Hilborn, R. C. (1994): *Chaos and nonlinear dynamics*, Oxford University Press. (I,1,2).
12. Hirsch, M.W. y S. Smale (1974): *Differential Equations, Dynamical Systems and Linear Algebra*. Academic Press. (A,1,2).
13. (BB) Keener, J. y J. Sneyd (1998): *Mathematical Physiology*, Springer Verlag. (A,2,3).
14. (BB) Kot, M. (2001): *Elements of Mathematical Ecology*, Cambridge University Press. (I,1,2).
15. (BB) Jordan, D. W. y P. Smith (1994): *Nonlinear Differential Equations*, Clarendon Press. (I,1,2).
16. (BB) Murray, J. D. (1993): *Mathematical Biology*, Springer Verlag. (A,1,2,3).
17. (BB) Nicolis, Gregoire e Ilya Prigogine (1977): *Self-organization in non-equilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons. (I,1,2,3).
18. (BB) Perko, L. (1996): *Differential Equations and Dynamical Systems*. Springer Verlag (I,1,2).
19. (BB) Sánchez Garduño, F., P. Miramontes y J. L. Gutiérrez Sánchez (coordinadores) (2002): *Clásicos de la biología matemática*. Siglo XXI-CEIICH-UNAM. Colección Aprender a Aprender.
20. (BB) Scott, S. K. (1993): *Chemical Chaos*, Clarendon Press, Oxford.
21. (BB) Wiggins, S. (1990): *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, Springer Verlag. (A,1,2).

### 7.5.2. Procesos estocásticos

1. Ando, Bruno y Salvatore Graziani (2000): *Stochastic Resonance: Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers.
2. Crauel, Hans y Matthias Gundlach (Editores) (1999): *Stochastic Dynamics*. Nueva York. Springer Verlag.
3. Grasman, Johan, O. A. Van Herwaarden, y C. A. Van Herwaarden. (1999): *Asymptotic Methods for the Fokker-Planck Equation and the Exit Problem in Applications* (Springer Series in Synergetics). Berlín. Springer Verlag.
4. Haken, Hermann (1974): *Synergetics: An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Berlín. Springer Verlag.
5. Medio, Alfredo (2001): *Non-Linear Dynamics: A Primer*. Cambridge University Press.
6. Millionas, Mark, J.D. Simon et al. (Editores) (1996): *Fluctuations and Order: The New Synthesis*. Nueva York. Springer Verlag.
7. Montroll, E.W. y B.J. West (1979): "On an Enriched Collection of Stochastic Processes" en *Fluctuations Phenomena*. (Montroll, E.W. y J.L. Lebowitz, Editores) North Holland.
8. Nicolis, Gregoire e Ilya Prigogine (1977): *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. Wiley, John & Sons, Incorporated.
9. Okubo, Akira (1986): "Dynamical aspects of animal grouping: swarms, schools, flocks and herds" en *Advanced Biophysics*: **22** (pp. 1-94).
10. Risken, Hannes (1989): *The Fokker-Planck Equation: Methods of Solution and Applications*. Berlín. Springer.



# Capítulo 8

## Sistemas complejos

En la línea curricular de Sistemas Complejos se construyen modelos matemáticos, es decir, representaciones formales específicas que corresponden a la cosmovisión discutida extensamente en el capítulo 2, cuyo desarrollo histórico conceptual y categorías generales para pensar el mundo constituyen parte fundamental de los contenidos de los cursos de Ciencia y Sociedad I y II (véase el capítulo 6, *passim*) y los construye casi siempre desde la perspectiva que se llama, metafóricamente, de “grano fino”; esto es, aborda la modelación de la dinámica a nivel de agente o elemento constitutivo del sistema. Este enfoque complementa, además, el propio de la línea de Dinámica no Lineal (véase el capítulo 7) que es, básicamente, de “grano grueso” o de campo medio.

Así, en los cursos de Sistemas Complejos I y II se busca que los estudiantes desarrollen la capacidad de representar, analizar y simular computacionalmente sistemas complejos con herramientas adecuadas para, en cada caso, identificar cómo se manifiestan características como la emergencia de propiedades que no están en los agentes individuales pero se presentan en el sistema merced a la acción colectiva o cómo ocurre la autoorganización hacia la zona crítica y qué capacidades del sistema se optimizan cuando la dinámica opera en esta zona.

A la par del instrumental que se pone a disposición en la línea de Dinámica no Lineal, las herramientas, métodos y significados de esta línea son fundamentos para poder cumplir con los propósitos del Taller de Complejidad (véase la sección 6.3) y, desde luego, con la investigación necesaria para presentar la tesis de grado de la Maestría. Por ello, en ambos cursos se presentan abundantemente temas que coinciden con los de las otras dos líneas

curriculares y que, como se ha explicado, aportan el instrumental que permite incorporar la acción de componentes individuales a diferentes dinámicas.

Como se espera en un programa de posgrado, no todos los temas deben abordarse detalladamente en clase; se parte del supuesto de que los estudiantes tienen la madurez suficiente para asumir la responsabilidad de apropiarse de los contenidos con autonomía de los profesores; así, las sesiones en el aula o el laboratorio se conciben como espacios donde se discuten conceptos y técnicas, básicos para resolver problemas típicos pero el aprendizaje se dará solamente cuando los estudiantes se aboquen a resolver las tareas dedicándole a este trabajo al menos el mismo tiempo que el previsto a las sesiones de clase, utilizando para las simulaciones numéricas de los diferentes tipos de sistema un lenguaje de programación como *Java* o *Python* o mediante un pseudolenguaje como los de *Netlogo*, *Maple* o *Mathematica*.

Los estudiantes podrán obtener la certificación de estos cursos de dos maneras: mediante evaluaciones parciales, programadas a lo largo del semestre para examinar si los estudiantes se apropiaron del contenido de cada uno de los temas o con un examen final<sup>1</sup> que implicará una réplica oral ante el Comité de Certificación correspondiente.

En el temario de Sistemas Complejos II, los subtemas indicados con un asterisco (\*) son optativos y se cubrirán según el interés de los estudiantes y de acuerdo con los profesores del curso.

## 8.1. Temario de Sistemas Complejos I

### 1. Introducción a los Sistemas Complejos

- a) No linealidad
- b) Azar y determinismo, regularidad y caos
- c) Complejidad, herramientas
- d) Sistemas fuera de equilibrio, ruptura de simetría

### 2. Fractales

- a) Simetrías en la naturaleza
- b) Auto semejanza y estructura geométrica

---

<sup>1</sup>Por la extensión de los temarios, esta opción no es recomendable.

- 1) Ejemplos de autosemejanza en el espacio
  - 2) Ejemplos de autosemejanza en el tiempo
  - 3) Implicaciones biológicas de la autosemejanza
  - 4) Autosemejanza implica una relación de escalamiento
  - 5) Relaciones de escalamiento
  - 6) Invariancia de escala
  - c) Conjunto de Cantor
  - d) Dimensión fractal
    - 1) Dimensión de autosemejanza
    - 2) Dimensión de capacidad y conteo de cajas
    - 3) Dimensión de Hausdorff
    - 4) Dimensión topológica
    - 5) Dimensión de embebimiento
  - e) Propiedades estadísticas
    - 1) La autosemejanza implica que los momentos no existen
    - 2) Ejemplos
  - f) Fractales aleatorios
  - g) Crecimiento fractal y percolación
3. Criticalidad
- a) Teoría de Landau de transiciones de fase
    - 1) Transiciones de fase de primer y segundo orden
    - 2) Rompimiento espontáneo de simetría
  - b) Criticalidad en Sistemas dinámicos
    - 1) Función de correlación
    - 2) Longitud de correlación
    - 3) Invariancia de escala
    - 4) Universalidad en el punto crítico
  - c) Distribuciones libre de escala
    - 1) Ley de Pareto
    - 2) Ley de Zipf

- 3) Distribución log-Normal
- 4) Ruido  $1/f$

#### 4. Autómatas Celulares

##### a) Autómatas celulares en 1D

- 1) El autómata celular
- 2) Funciones de transición
- 3) Reglas totalísticas
- 4) Condiciones de frontera
- 5) Algunos autómatas elementales
  - a'* Autómatas celulares que conservan su número
  - b'* Flujo vehicular
- 6) Clasificación de Wolfram de los autómatas celulares elementales
  - a'* Parámetro de Langton
- 7) Computación universal

##### b) Autómatas celulares en 2D: el Juego de la Vida de Conway

- 1) Formas de vida
- 2) Osciladores
- 3) Deslizadores
- 4) Computación universal

##### c) Aplicaciones

- 1) Modelo de segregación de Schelling
- 2) Dilema del prisionero
- 3) Predador-Presa
- 4) Crecimiento de colonias de Bacterias
- 5) Algoritmo genético
- 6) Difusión
- 7) Espín de Ising
- 8) La pila de arena
- 9) Modelo del fuego en el bosque

##### d) Auto-organización hacia la zona crítica.

## 8.2. Temario de Sistemas Complejos II

### 1. Modelación Basada en Agentes

- a) Denificaciones
- b) Protocolos
- c) Efectos espaciales
- d) Efecto de movimiento de agentes
- e) Aprendizaje y comunicación entre agentes
- f) Aplicaciones
  - 1) Cooperación
  - 2) Emergencia de normas
  - 3) Estrategia toma y daca
  - 4) Batalla de los sexos
  - 5) Matching pennies
  - 6) Problema de la ovación de pie
  - 7) Bancos de peces
  - 8) Tráfico vehicular

### 2. Redes

- a) Teoría general
  - 1) Conceptos básicos de la teoría de grafos
  - 2) Propiedades de las redes aleatorias
  - 3) Grafos con distribuciones de grado arbitrarias
  - 4) Formalismo de la función generadora de probabilidad
  - 5) Redes exponenciales
  - 6) Redes libres de escala
  - 7) Propiedad de mundo pequeño
    - a'* Modelos de mundo pequeño
  - 8) Crecimiento de redes
    - a'* Enlace igualitario
    - b'* Enlace preferencial
    - c'* Transición de fase

- b) (\*) Redes booleanas
    - 1) Variables booleanas y topologías de grafos
    - 2) Funciones de acoplamiento
    - 3) Dinámica
    - 4) El flujo de información a través de la red
    - 5) El diagrama de fase de campo medio
    - 6) El diagrama de fase de bifurcación
    - 7) Redes booleanas libres de escala
    - 8) El ciclo celular de la levadura
  - c) (\*) Redes Neuronales
    - 1) Introducción
    - 2) Estructura y características
3. Medios excitables y formación de patrones
- a) (\*) Formación de patrones en pieles de animales con AC
  - b) Medios Excitables
    - 1) La máquina de Hodgepodge
    - 2) reacción de Belousov-Zabotinsky
    - 3) Actividad neuronal
  - c) Ecuaciones de difusión. Solución.
  - d) Ecuaciones de reacción difusión. Análisis de estabilidad.
  - e) (\*) Solitones.
4. Series de tiempo no lineales
- a) Teorema de Takens
  - b) Reconstrucción del atractor
  - c) Falsos primeros vecinos
  - d) El tiempo de retraso
  - e) Información mutua promedio
  - f) Gráficas de recurrencia

5. (\*) Computabilidad, procesos informáticos y cognitivos
  - a) Medios computables y cómputo emergente
  - b) Computadoras naturales y artificiales
  - c) Computabilidad e incomputabilidad
  - d) Sistemas clasificadores y reconocimiento de patrones

## 8.3. Bibliografía de la línea

### 8.3.1. Caos

#### Básicos

1. Cohen, Jack y Ian Stewart (1995): *The Collapse of Chaos: Discovering Simplicity in a Complex World*. Nueva York, Penguin. (E).
2. Coveney, Peter V. y Roger Highfield (1992): *The Arrow of Time: A Voyage Through Science to Solve Time's Greatest Mystery*. Nueva York, Fawcett Books. (E).
3. Coveney, Peter V. y Roger Highfield (1996): *Frontiers of Complexity : The Search for Order in a Chaotic World*. Nueva York, Fawcett Books. (E).
4. (BB) Gleick, James (1988): *Chaos: Making a New Science*. Nueva York, Penguin. (E).
5. (BB) Hall, Nina (Editora) (1991): *Exploring Chaos: A Guide to the New Science of Disorder*. Nueva York, Norton. (E).
6. (BB) Nicolis, Grégoire e Ilya Prigogine (1989): *Exploring Complexity : An Introduction*. Nueva York, W. H. Freeman & Co. (E).
7. (BB) Peak, David y Michael Frame (1994): *Chaos Under Control: The Art and Science of Complexity*. Nueva York, W. H. Freeman & Co. (E).
8. Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers (1989): *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue With Nature*. Nueva York, Bantam Doubleday. (E).

9. Stengers, Isabelle e Ilya Prigogine (1995): *The End of Certainty : Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. Nueva York, Free Press. (E).
10. (BB) Stewart, Ian (1990): *Does God Play Dice?: The Mathematics of Chaos*. Cambridge, Blackwell Pub. (E).
11. Stewart, Ian (1996). *From Here to Infinity*. Oxford, Oxford University Press. (E).
12. (BB) Stewart, Ian (1998). *Life's Other Secret : The New Mathematics of the Living World*. Nueva York, John Wiley. (E).

### Intermedios y avanzados

1. (BB) Baker Gregory L. y Jerry P. Gollub (1990): *Chaotic Dynamics*, Cambridge. Cambridge University Press. (I) (Texto).
2. Beck, Christian y Friedrich Schlögl (1993): *Thermodynamics of Chaotic Systems, an Introduction*. Cambridge Nonlinear Science Series, Vol. 4, Cambridge. Cambridge University Press. (A)
3. Bergé Pierre, Yves Pomeau y Christian Vidal, (1988): *L'ordre dans le chaos*, París. Hermann. (I) (Texto).
4. Boccara, Nino (2004): *Modeling Complex Systems*. Nueva York. Springer. (A)
5. (BB) Cvitanovic, Predrag (1989): *Universality in Chaos*. Bristol, Adam Hilger. (I)
6. (BB) Davies, Paul (Editor) (1989): *The New Physics*, Cambridge, Cambridge University Press. (I)
7. (BB) Devaney, Robert L. (1989): *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems. Theory and Experiment*. Redwood City, Addison-Wesley. (I)
8. (BB) Frøyland, Jan (1992): *Introduction to Chaos and Coherence*. Bristol, Institute of Physics. (A)
9. (BB) Glass, Leon y Michael C. MacKey, (1988). *From Clocks to Chaos: The Rhythms of Life*. Princeton, Princeton University Press. (A)

10. Guckenheimer John y Philip Holmes (1983): *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, Nueva York, Springer. (A)
11. Holden, Arun V. (Editor) (1986): *Chaos*. Princeton, Princeton University Press. (I)
12. (BB) Jackson, Edwin Atlee (1989): *Perspectives of Nonlinear Dynamics*, Volumen 1, Cambridge, Cambridge University Press. (A)
13. (BB) Jackson, Edwin Atlee (1991): *Perspectives of Nonlinear Dynamics*, Volumen 2, Cambridge, Cambridge University Press. (A)
14. (BB) Kadanoff, Leo P. (1993): *From Order to Chaos I. Essays: Critical, Chaotic and Otherwise*. World Scientific Series on Nonlinear Science **A: 1**. Singapur, World Scientific. (A)
15. (BB) Kadanoff, Leo P. (1999): *From Order to Chaos II. Essays: Critical, Chaotic and Otherwise*. World Scientific Series on Nonlinear Science **A: 32**. Singapur, World Scientific. (A)
16. (BB) Kaplan, Daniel y Leon Glass (1995): *Understanding Nonlinear Dynamics*, Nueva York, Springer-Verlag. (Orientado hacia la biología). (I)
17. Kellert Stephen H. (1993): *In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems*. Chicago, Chicago University Press. (Tratamiento histórico filosófico). (I)
18. (BB) Mikhailov, Alexander S. y Alexander Yu. Loskutov (1991): *Foundations of Synergetics II: Complex Patterns*. Springer Series in Synergetics: **52**. Berlín. Springer-Verlag. (A)
19. (BB) Mullin, Tom (Editor) (1993): *The Nature of Chaos*. Oxford. Oxford University Press. (I)
20. (BB) Ott, Edward (1993): *Chaos in Dynamical Systems*. Cambridge, Cambridge University Press. (A)
21. Ruelle, David (1991): *Chance and Chaos*. Princeton, Princeton University Press. (A)

22. (BB) Strogatz, Steven Henry (1994): *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Reading, Perseus Books. (I)
23. Wiggins, Stephen (1979): *Global Bifurcations and Chaos: Analytical Methods*. Applied Mathematical Sciences: 73. Nueva York, Springer. (A)
24. (BB) Williams, Garnett P. (1997): *Chaos Theory Tamed*. Washington, National Academy Press. (I)

### 8.3.2. Fractales

1. Barnsley Michael F. (1988): *Fractals Everywhere*. Boston, Academic Press. (I)
2. Falconer, Kenneth J. (1990): *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. Chichester, John Wiley. (A)
3. Mandelbrot, Benoît (1977): *Fractals, Form, Chance and Dimension*, San Francisco, W.H. Freeman (Texto). (A)
4. Mandelbrot, Benoît (1988): *Fractal Geometry of Nature*. San Francisco, W. H. Freeman. (A)
5. (BB) Peitgen Heinz-Otto, Dietmar Saupe, H. Jurgens, L. Yunker (1992): *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Nueva York, Springer Verlag. (A)
6. (BB) Peitgen, Heinz-Otto y Hartmut Jurgen (1991): *Fractals for the Classroom: Strategic Activities*. Nueva York, Springer Verlag. (I)
7. (BB) Schroeder, Manfred Robert (1991): *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. Nueva York, W. H. Freeman. (A)
8. West, Bruce J. y William Deering (1995): *The Lure of Modern Science, Fractal Thinking*, Singapur, World Scientific. (I)

### 8.3.3. Complejidad

#### Básicos

1. Anderson Phillip W., (1994): “Physics: The Opening to Complexity”. Prefacio al *National Academy of Science Proceedings of the Colloquium on Physics: The Opening of Complexity*, 27–28 de junio de 1994, Irvine. (E)
2. Coveney, P. y Roger Highfield, (1992): *The Arrow of Time: A Voyage Through Science to Solve Time’s Greatest Mystery*. Nueva York, Fawcett Books. (E)
3. Coveney, P. y Roger Highfield (1996). *Frontiers of Complexity : The Search for Order in a Chaotic World*. Nueva York, Fawcett Books. (E)
4. (BB) Goodwin, Brian (1994): *How the Leopard Changed its Spots. The Evolution of Complexity*, Nueva York, Touchstone. (E)
5. Kauffman, Stuart, (1994): *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford, Oxford University Press. (E)
6. (BB) Lewin, Roger (2000): *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. Chicago, University of Chicago Press. (E)
7. Nicolis, Grégoire e Ilya Prigogine (1989): *Exploring Complexity: An Introduction*. Nueva York, W. H. Freeman & Co. (E)
8. Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers (1989): *Order Out of Chaos: Man’s New Dialogue With Nature*. Nueva York, Bantam Doubleday. (E)
9. Stewart, Ian (1998): *Life’s Other Secret: The New Mathematics of the Living World*. Nueva York, John Wiley. (E)
10. (BB) Waldrop, M. Mitchell (1992): *Complexity: the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. Nueva York, Touchstone Books. (E)

**Intermedios y avanzados**

1. Abraham, Neal B., A. M. Albano, A. Passamante, P. E. Rapp y R. Gilmore (Editores) (1992): *Complexity and Chaos: Proceedings of the Second Bryn Mawr Workshop on Measures on Complexity and Chaos*. Bryn Mawr, Pennsylvania, 13–15 de agosto; Singapur, World Scientific. (A)
2. Auyang, S.Y. (1998): *Foundations of Complex System Theories: In Economics, Evolutionary Biology, and Statistical Physics*. Cambridge, Cambridge University Press.
3. (BB) Badii, Remo y Antonio Politi (1997): *Complexity: Hierarchical Structures and Scaling in Physics*. Nueva York, Cambridge University Press.
4. (BB) Bak, Per (1996): *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. Nueva York, Copernicus.
5. (BB) Bak, Per y M. Paczuski (1995): “Complexity, Contingency, and Criticality” en *Proceedings of the National Academy of Science* **92**: 6689–6696.
6. Bossomaier, Terry R. J. y David G. Green (Eds.), (1999): *Complex Systems*. Cambridge, Cambridge University Press.
7. (BB) Casti, John L. (1996): *Would-Be Worlds: How Simulation Is Changing the Frontiers of Science*. Nueva York, John Wiley & Sons.
8. Davies, Paul (Editor) (1989): *The New Physics*, Cambridge, Cambridge University Press.
9. de Gennes, Pierre-Gilles (1979): *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Ithaca, Cornell University Press.
10. (BB) Flake, Gary William. (1999): *The Computational Beauty of Nature*, Cambridge, MIT Press.
11. Glansdorff, P. e Ilya Prigogine (1971): *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*, Londres, Wiley–Interscience.

12. Goldberg, David Edward (1989): *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reading, Addison-Wesley.
13. (BB) Haken, Hermann (1978): *Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics*, Chemistry and Biology. Springer Series in Synergetics, Volumen 1. Berlín, Springer-Verlag.
14. Haken, Hermann (2000): *Information and Self-Organization : A Macroscopic Approach to Complex Systems* (Springer Series in Synergetics, Volumen 40. Berlín, Springer-Verlag.
15. Holland, John Henry (1996): *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, Addison-Wesley.
16. Holland, John Henry (1998): *Emergence: From Chaos to Order*. Reading, Addison-Wesley.
17. Jensen, Henrik J. (2000): *Self-Organized Criticality: Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems*. Cambridge Lecture Notes in Physics, Volumen 10. Cambridge, Cambridge University Press.
18. Kadanoff, Leo P. (2000): *Statistical Physics, Statics, Dynamics and Renormalization*. Singapur, World Scientific.
19. Kauffman, Stuart A. (1993): *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Nueva York, Oxford University Press.
20. (BB) Mainzer, Klaus. (1997): *Thinking in Complexity*. Berlin, Springer-Verlag.
21. Nijhout, H. F., Lynn Nadel y Daniel Stein (Editores) (1997): *Pattern Formation in the Physical and Biological Sciences*. Santa Fe Institute Studies in The Sciences of Complexity Lecture Notes, Volumen 5. Reading, Addison-Wesley.
22. Schroeder, Manfred Robert (1991): *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. Nueva York, W. H. Freeman.
23. Solé, Ricard V. y Susanna Manrubia (1993): *Orden y Caos en Sistemas Complejos*. Barcelona, Ediciones Universidad de Catalunya.

24. Vincent, Thomas L., Alistair I. Mees y Leslie S. Jennings (Editores) (1990): *Dynamics of Complex Interconnected Biological Systems*. Proceedings of a workshop held in Albany, Western Australia, del 1 al 5 de enero de 1989.
25. Williams, Garnett P. (1997): *Chaos Theory Tamed*. Washington, National Academy Press.

### 8.3.4. Para el Taller de Complejidad

#### Universo

1. Alemán, R. et al. (2000): *El universo en el II milenio* (Astrobiología). Madrid, Equipo Sirius.
2. Darling, David J. (2001): *Life Everywhere: The Maverick Science of Astrobiology*. Nueva York, Basic Books.
3. Ferraz-Mello, S. (1992): “Chaos, Resonance, and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System” en *Proceedings of the 152nd Symposium of the International Astronomical Union* en Angra dos Reis, Brasil, 15–19 de julio de 1991. Londres, Kluwer.
4. Grady, Monica M. (2001): *Astrobiology*. Washington, Smithsonian Institution.
5. Joseph, Rhawn (2001): *Astrobiology, the Origin of Life, and the Death of Darwinism* (2nd Edition). California University Press.
6. Parker, Barry R. (1996): *Chaos in the Cosmos: The Stunning Complexity of the Universe*. Nueva York, Perseus Press.

#### Materia

1. Bernstein, Max P., Jason P. Dworkin, Scott A. Sandford, George W. Cooper y Louis J. Allamandola, (2002): “Racemic amino acids from the ultraviolet photolysis of interstellar ice analogues” en *Nature* **416**: 401–403 (28 de marzo de 2002).
2. Bowley, Roger y Mariana Sánchez (1996): *Introductory Statistical Mechanics*. Oxford, Clarendon.

3. Chambers, J. E. (2001): “Making more terrestrial planets” en *Icarus* **152**: 205–224.
4. Chyba, Christopher y Cynthia B. Phillips (2002): “Europa as an abode of life” en *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* **32**: 47–67.
5. Cody G. D., C. M. O. D. Alexander, y F. Tera (2002): “Elucidating the chemical evolution of organic matter in carbonaceous chondrites” en *Geochimica et Cosmochimica Acta* **66** (15A): A146-A146 Suppl. (1 de agosto de 2002).
6. Eigen, Manfred (1986): “The Physics of Molecular Evolution” en *Chemica Scripta* **26B**: 13–26.
7. (BB) Futuyma, Douglas J. (1986): *Evolutionary Biology*. 2nd. Edition. Sunderland, Sinauer.
8. González, Guillermo, Donald Brownlee y Peter Ward (2001): “The Galactic Habitable Zone: Galactic Chemical Evolution” en *Icarus* **152**: 185–200.
9. (BB) Graur, Dan y Wen–Hsiung Li (2000): *Fundamentals of molecular evolution*. 2nd. Edition. Sunderland, Sinauer.
10. Green, S. (1981): “Interstellar chemistry: Exotic molecules in space.” en *Annual Rev. Phys. Chem.* **32**: 103-138.
11. Herpin F., J. R. Goicoechea, J. R. Pardo, et al. (2002): “Chemical evolution of the circumstellar envelopes of carbon-rich post asymptotic giant branch objects” (Part 1) en *Astrophysics J.* **577** (2): 961-973 (1 de octubre de 2002).
12. Lia C., L. Portinari y G. Carraro (2002): “Star formation and chemical evolution in smoothed particle hydrodynamics simulations: a statistical approach” en *Mon. Not. Astronomical Society* **335** (3): 864-864 (21 de septiembre de 2002).
13. Mouhcine, M. y T. Contini, (2002): “Chemical evolution of starburst galaxies: How does star formation proceed?” en *Astron. Astrophys.* **389** (1): 106-114 (julio de 2002).

14. Prantzos N., (2002): “The chemical evolution of light elements in our galaxy and some implications for ‘cosmic chemical evolution’” en *IAU Symp.* **187**: 47-56.
15. Ryan S. G., (2002): “Big Bang nucleosynthesis, Population III, and stellar genetics in the galactic halo” en *Publ. Astron. Soc. Aust.* **19 (2)**: 238-245.
16. Schuster, P. (1986): “The physical basis of molecular evolution” en *Chemica Scripta* **26B**: 27-41.
17. Songaila A. y L. L. Cowie (2001): “The chemical evolution of the Universe” en *IAU Symp.* **204**: 323-331.

### Vida

1. Richard K. Belew y Melanie Mitchell (Editores) (1996): *Adaptive Individuals in Evolving Populations: Models and Algorithm*. Reading, Massachusetts. Addison-Wesley. (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Proceedings Volume **23**).
2. Blomberg, Clas (1994): “The Physicist’s Road to Theoretical Biology and the Mind-Matter Problem” en *Journal of Theoretical Biology* **171**: 41-52.
3. Boden, Margaret A. (Editor) (1996): *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford, Oxford University Press. (Oxford Readings in Philosophy).
4. Brown, James H. y Geoffrey B. West (Editores) (2000): *Scaling in Biology*. Oxford, Oxford University Press. (Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity).
5. Camazine, Scott (Editor) (2001): *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton, Princeton University Press (Princeton Studies in Complexity).
6. Cramer, Friedrich (1993): *Chaos and Order. The Complex Structure of Living Systems*. (D. I. Loewus, Traductor). Nueva York, John Wiley & Sons.

7. Dieckmann, Ulf, Richard Law y Johan A. J. Metz (Editores). *The Geometry of Ecological Interactions: Simplifying Spatial Complexity*. Cambridge, Cambridge University Press. (Cambridge Studies in Adaptive Dynamics.).
8. (BB) Eckert, Roger y Fernald Russell (1998): *Fisiología animal: mecanismos y adaptaciones*. 2da. Edición. (Josefina Blasco Mínguez, Traductora). Madrid, McGraw-Hill–Interamericana.
9. Goldberger A. L., D. R. Rigney y B. J. West (1990): “Chaos and Fractals in Human Physiology” en *Scientific American* **262**: 34–41.
10. Goodwin, Brian (1994): *How the Leopard Changed its Spots. The Evolution of Complexity*. Nueva York, Touchstone.
11. Haken, Hermann (2000): *Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Berlín, Springer–Verlag. (Springer Series in Synergetics).
12. (BB) Hartl, Daniel L. (1988): *A Primer of Population Genetics*. 2nd. Edition. Sunderland, Sinauer.
13. Holland, John H (1996): *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Lugar, Perseus Press.
14. Hopfield, J. J. (1994): “Physics, Computation, and Why Biology Looks so Different” en *Journal of Theoretical Biology* **172**: 53–60.
15. Huberman, B. A. y T. Hogg (1986): “Complexity and Adaptation” en *Physica* **22D**: 376–384.
16. Kaneko, Kunihiko e Ichiro Tsuda (2000): *Complex Systems: Chaos and Beyond, A Constructive Approach with Applications in Life Sciences*. Berlín, Springer–Verlag.
17. (BB) Kauffman, Stuart A. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Nueva York, Oxford University Press.
18. Kropotkin, Peter (1989): *Mutual Aid: A Factor of Evolution*. Boston, Black Rose Books.

19. Langton, Christopher G. (Editor) (1995): *Artificial Life: An Overview*. Cambridge, MIT Bradford Books. (Complex Adaptive Systems).
20. Margulis, Lynn y Dorion Sagan (2000). *What Is Life?*. (Foreword by Niles Eldredge). Berkeley, University of California Press.
21. Margulis, Lynn y Dorion Sagan (1997). *Microcosmos : Four Billion Years of Evolution from Our Microbial Ancestors*. (Foreword by Lewis Thomas). Berkeley, University of California Press.
22. Miyakawa S., H. J. Cleaves y S. L. Miller, (2002): “The cold origin of life: A. Implications based on the hydrolytic stabilities of hydrogen cyanide and formamide” en *Origins Life Evol.* **B 32 (3)**: 195-208 (junio de 2002).
23. Morris, Richard (1999): *Artificial Worlds: Computers, Complexity, and the Riddle of Life*. Nueva York, Plenum Trade.
24. Murphy, Michael P. y Luke A. J. O’Neill (Editores) (1995): *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology*. Nueva York, Cambridge University Press.
25. (BB) Núñez–Farfán Jaime y Luis E. Eguiarte (Compiladores). (1999): *La evolución biológica*. México, Facultad de Ciencias e Instituto de Ecología, UNAM-CONABIO.
26. (BB) Schmidt–Nielsen, Knut (1984): *Scaling. Why is animal size so important?* Cambridge, Cambridge University Press.
27. Schrödinger, Erwin (1992): *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge, Cambridge University Press.
28. Sigmund, Karl (1995): *Games of Life: Explorations in Ecology, Evolution and Behaviour*. Penguin.
29. Sernetz M., B. Gelléri y J. Hofmann (1985): “The organism as bio-reactor. Interpretation of the reduction law of metabolism in terms of heterogeneous catalysis and fractal structure” en *Journal of Theoretical Biology* **117**: 209–230.
30. Solé, Ricard y Brian Goodwin (2001): *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology*. Nueva York, Basic Books.

31. Stewart, Ian (1998): *Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World*. Nueva York, John Wiley.
32. Ulanowicz, Robert E. (1997): *Ecology, the Ascendent Perspective*. Nueva York, Columbia University Press. (Complexity in Ecological Systems Series).
33. West G. B., J. H. Brown y B. J. Enquist (1999): "The Fourth Dimension of Life: Fractal Geometry and Allometric Scaling of Organisms" en *Science* **284**: 1677–1679.

## Sociedad

### Cooperación y auto-organización social

1. Axelrod, Robert M. (1990): *The Evolution of Cooperation*. Londres, Penguin.
2. Axelrod, R.M. (1997): *The Complexity of Cooperation*. Princeton, Princeton University Press.
3. Bonabeau, Eric, Marco Dorigo y Guy Theraulaz (1999): *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Nueva York, Oxford University Press. (Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity).
4. Camazine, Scott (Editor) (2001): *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton Studies in Complexity. Princeton, Princeton University Press.
5. Dugatkin, Lee Alan (1997): *Cooperation Among Animals: An Evolutionary Perspective*. Nueva York, Oxford University Press.
6. Eldredge, Niles y Marjorie Greene (1992): *Interactions: the Biological Context of Social Systems*. Nueva York, Columbia University Press.
7. Epstein, Joshua M. y Robert L. Axtell (1996): *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington, Brookings Institution. (A monograph of the 2050 Project, a collaborative effort of the Brookings Institution, the Santa Fe Institute and the World Resources Institute).

8. Gilbert, Nigel y Rosaria Conte (Editores) (1995): *Artificial Societies. The Computer Simulation of Social Life*. Londres, UCL Press.
9. Gumerman, George J. (2000): *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*. (Editor: T. A. Kohler), Nueva York, Oxford University Press. (Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity).
10. Herrmann, Heinz (1998). *From Biology to Sociopolitics: Conceptual Continuity in Complex Systems*. New Haven, Yale University Press.
11. Karlqvist, Anders (1994): *Cooperation and Conflict in General Evolutionary Processes*. (Editor: J. L. Casti), Nueva York, John Wiley & Sons.
12. Kropotkin, Peter (1989): *Mutual Aid: A Factor of Evolution*. Boston, Black Rose Books.
13. Moritz, Robin F. A. y Edward E. Southwick (1992): *Bees as superorganisms: an evolutionary reality*. Berlín, Springer-Verlag.
14. Omicini, Andrea, Robert Tolksdorf y Franco Zambonelli (Editores) (2000): *Engineering Societies in the Agents World: First International Workshop*. Berlín, Springer-Verlag.
15. Resnick, Mitchel (1997): *Turtles, Termites, and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds*- Cambridge, MIT Press. (Complex Adaptive Systems).
16. Ridley, Matt (1998): *The Origins of Virtue: Human Instincts and the Evolution of Cooperation*. Nueva York, Viking.
17. Watts, Duncan J. (1999): *Small Worlds: the Dynamics of Networks between Order and Randomness*. Princeton, Princeton University Press. (Princeton Studies in Complexity).

### Organizaciones e Instituciones

1. Allen, Peter M. (1997): *Cities and Regions as Self-Organizing Systems. Models of Complexity*. Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers.

2. Arthur, Brian W. (1997): *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, Perseus Books. (Proceedings Volume, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Vol **27**).
3. Axelrod, Robert y Michael D. Cohen (2000): *Harnessing Complexity: Organizational Implications of a Scientific Frontier*. Reading, Free Press.
4. Mandelbrot, Benoît (Editor) (1997): *Fractals and Scaling in Finances: Discontinuity, Concentration, Risk*. Nueva York, Springer-Verlag.
5. Mantegna, Rosario Nunzio y H. Eugene Stanley (1999): *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. Nueva York, Cambridge University Press.
6. Pascale, Richard T., Mark Millemann y Linda Gioja (2000): *Surfing the Edge of Chaos: The Laws of Nature and the New Laws of Business*. Nueva York, Three Rivers Press.
7. Peters, Edgar (1994): *Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics*. Nueva York, John Wiley & Sons.
8. Stacey, Ralph D. (1996): *Complexity and Creativity in Organizations*. Berrett-Koehler.
9. Stacey, Ralph D., Douglas Griffin y Patricia Shaw (2001): *Complexity and Management: Fad or Radical Challenge?* (Complexity and Emergence in Organisations). Routledge.

### Lecturas adicionales

1. Asimov, Isaac. (1993): *Nueva guía de la ciencia, ciencias físicas*, Barcelona, RBA.
2. Atlan, Henri (1990): *Entre el cristal y el humo: ensayo sobre la organización de lo vivo*. Madrid, Debate.
3. Bak Per, C. Tang y K. Wiesenfeld (1987): "Self-organized criticality. An explanation of  $1/f$  noise" en *Physical Review Letters*: **59**: 381.

4. Barrow-Green, J. (1997): “Poincaré and the three body problem” en *History of Mathematics*: **11**, American Mathematical Society y London Mathematical Society.
5. Bonabeau, Eric et al. (1997): “Self-organization and alternative models in insect societies” en *Trends Ecol. Evol.* **12**: 188.
6. Bonabeau, Eric y Guy Theraulaz (2000): “Swarm smarts” en *Scientific American*, Marzo de 2000: 54-61.
7. Bricmont, J. (1996): “Science of chaos or chaos in science?”, en *Annals of the New York Academy of Science*: **775**: 131-175.
8. Briggs, John y F. David Peat (1990): *Espejo y reflejo: del caos al desorden*, Barcelona, Gedisa.
9. Cole, B. J. (1991): “Short-term activity cycles in ants: generation of periodicity by worker interaction” en *American Naturalist* **137**: 244–259.
10. Cole, B. J. (1991): “Is animal behaviour chaotic?: evidence from the activity of ants” en *Proc. R. Soc. London B* **244**: 253–259.
11. Cole, B. J. et al. (1996): “Mobile Cellular Automata models of ant behavior: Movement activity of *Leptothorax allardycei*” en *American Naturalist* **148**: 1–15.
12. Diacu, Florin y Phillip Holmes (1996): *Celestial Encounters: The Origins of Chaos and Stability*. Princeton, Princeton University Press. (Princeton Science Library).
13. Ditto, W. L. y L. M. Pecora (1993): “Mastering chaos” en *Scientific American*, de agosto de 1993: 78-84.
14. Eyink, G. y N. Goldenfeld (1994): “Analogies between scaling in turbulence, field theory and critical phenomena”, en *Physical Review E* **50**: 4679–4683.
15. Feigenbaum, M. J. (1987): “Quantitative universality for a class of non-linear transformation” en *Journal of Statistical Physics*: **19**: 25.

16. Franks, N. R. et al. (1990): “Synchronization of the behaviour within nests of the ant *Leptothorax acervorum* (Fabricius): I. Discovering the phenomenon and its relation to the level of starvation” en *Bull. Math. Biol.* **52**: 597–612.
17. Franks, N. R., A. Wilby, B.W. Silverman y C. Tofts (1992): “Self-organizing nest construction in ants: sophisticated building by blind bulldozing”, *Anim. Behav.* **44**: 357–375.
18. Gell-Mann, M. (1992): “Complexity and complex adaptive systems” en *The evolution of Human Languages*, (Hawkins J. y M. Gell-Mann, Coords.), Reading, Addison Wesley, (pp. 3–18). (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings Vol. **10**).
19. Gleick, James (1987): *Chaos: Making a New Science*, Nueva York, Viking Penguin Inc.
20. Goodwin, Brian (1994): *How the Leopard Changed its Spots. The Evolution of Complexity*, Nueva York, Touchstone.
21. Grassberger, P. (1991): “Randomness, information and complexity”, en *Proceedings of the Fifth Mexican School on Statistical Physics*, (F. Ramos-Gómez, Coordinador), Singapur, World Scientific. (pp. 57–99).
22. Gutiérrez Sánchez, José Luis (2000): “Sociedad, política, cultura y sistemas complejos” en *Ciencias* **59**: 46–54. México, Facultad de Ciencias de la UNAM.
23. Kadanoff, Leo P. (1991): “Complex structures from simple systems”, en *Physics Today*: **44**, **3**: 9.
24. Kauffman, Stuart (1995): *At home in the Universe. The search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford, Oxford University Press.
25. Kellert, Stephen H. (1993): *In the Wake of Chaos*, Chicago, Chicago University Press.
26. Lorenz, Edward (1963): “Deterministic Nonperiodic Flow”, en *Journal of Atmospheric Sciences*: **20**: 130–141.

27. Margaleff, Ramón (1997): “Our Biosphere”, en *Excellence in Ecology*: **10**: 176. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Alemania.
28. Magnasco, M. (1993): “Forced thermal ratchets”, en *Physical Review Letters*: **71**: 1477–1481.
29. Martínez Mekler, Gustavo y Germinal Cocho, (1998): “Caos, crisis y complejidad” en *Las ciencias de la materia*. (Colección Aprendiendo a Aprender), (L. de la Peña, Coordinador), México, CEIICH-UNAM-Siglo XXI.
30. Martínez Mekler, Gustavo, (1993): “Dinámica y estructura de sistemas complejos”, en *Temas Selectos de Física Estadística*, (García-Colín, Leopoldo; F. Ramos Gómez y R. Rechtman, Coordinadores), México, El Colegio Nacional (pp. 141–227).
31. May, Robert (1976): “Simple mathematical models with very complicated dynamics” en *Nature*: **261**: 459–467.
32. Mikhailov, A. y Hermann Haken (Editores) (1993): *Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems*. Berlín, Springer-Verlag.
33. Miramontes, Octavio, Ricard Solé, y Brian C. Goodwin (1993a): “Collective behaviour of random activated mobile cellular automata” en *Physica D* **63**: 145–160.
34. Miramontes, Octavio, Ricard Solé, y Brian C. Goodwin (1993b): “Antichaos in Ants: The Excitability Metaphor at Two Hierarchical Levels” en *Proceedings of the Second European Conference on Artificial Life*, Bruselas, Bélgica.
35. Miramontes, Octavio. (1995): “Order-disorder transitions in the behavior of ant societies” en *Complexity* **1 (3)**: 56–60.
36. Miramontes, Pedro (1999): “El estructuralismo dinámico” en *Perspectivas en la teoría de sistemas*. (Santiago Ramírez, Coordinador). México, CEIICH-UNAM-Siglo XXI. (pp. 70–82).
37. Oono, Y. (1998): “Complex systems study as biology” en *International Journal of Modern Physics B*, **12**.

38. Pennisi, E. y R. Wade (1997) "Developing a new view of evolution", en *Science*: **277**: 34–37.
39. Peterson, Ivars (1993), *Newton's clock: Chaos in the solar system*, Nueva York, W.H. Freeman.
40. Poincaré, Henri (1909), *Science et méthode*. París, E. Flammarion.
41. Ruelle, David (1991): *Chance and Chaos*. Princeton, Princeton University Press.
42. Sagan, Carl (1998): *El mundo y sus demonios*. Barcelona, Planeta.
43. Shinbrot, T., C. Grebogi, E. Ott y J. A. Yorke (1993a): "Using small perturbations to control chaos", en *Nature*: **363**: 411–417.
44. Shinbrot, T. (1993b): "Chaos: unpredictable yet controllable?" en *Non-linear Science Today*: **3, 2**: 1–8.
45. Solé, R., O. Miramontes y B. C. Goodwin (1993a): "Collective oscillations and chaos in the dynamics of ant societies" en *J. Theor Biol.* **161**: 343.
46. Solé, R.V., O. Miramontes y B.C. Goodwin (1993b): "Emergent Behaviour in Insect Societies: Global Oscillations, Chaos and Computation" en: Haken, H. and A.
47. Solé, R. y O. Miramontes, (1995): "Information at the edge of chaos in fluid neural networks", *Physica D* **80**: 171–180.
48. Solé R.V. et al. (1996): "Complejidad en la frontera del caos", Investigación y Ciencia (edición española del Scientific American) **236**: 14–21.
49. Stewart, Ian. (1989), *Does God Play Dice?*, Cambridge, Blackwell.
50. Weigend Andreas S. y Neil A. Gershenfeld (Editores) (1993): *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*, Reading, Massachusetts. Addison-Wesley. (Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Comparative Time Series Analysis, held in Santa Fe, New Mexico, May 14–17, 1992).

51. Weinberg, Steven (1992): *Dreams of a Final Theory*, Nueva York, Pantheon Books.
52. Wilson, K. (1979): "Problems in physics with many scales of length" en *Scientific American*: **241**: 158 (agosto).

Parte IV  
Apéndices



# Apéndice A

## De los cursos de apoyo

Para contribuir a que, quienes lo requieran, puedan cubrir satisfactoriamente los requisitos de ingreso (véase la sección 3.2.2) y puedan afrontar exitosamente el plan de estudios propio de la Maestría, para cada generación podrán ofrecerse cursos intensivos de apoyo que no excederán un semestre de duración y que permitan a los candidatos interesados recuperar o complementar los conocimientos matemáticos básicos y que se acuerden con el Comité de Admisión.

La sola asistencia a estos cursos no implica que los candidatos serán aceptados como estudiantes de la Maestría; para ello, es preciso aprobar el examen diagnóstico y cumplir todos los requisitos de ingreso. Enseguida se da una lista de tópicos posibles de los cursos y algunas referencias que pueden seguirse puntualmente para cubrirlos.

### A.1. Álgebra superior y álgebra lineal

#### A.1.1. Contenido

1. Teoría general de los sistemas de ecuaciones lineales.
2. Álgebra matricial.
3. Números complejos.
4. Los polinomios y sus raíces.
5. Formas cuadráticas.

6. Espacios vectoriales.
7. Espacios euclidianos.
8. Cálculo de las raíces de un polinomio.
9. Campos y polinomios.
10. Polinomios en varias indeterminadas.
11. Polinomios de coeficientes racionales.
12. Forma normal de una matriz.
13. Grupos.

### A.1.2. Referencias

1. Kurosch, A.G. (1968): Curso de Álgebra Superior. Moscú, Mir.

## A.2. Ecuaciones diferenciales

### A.2.1. Contenido

1.
  1. Ecuaciones diferenciales de primer orden.
    - a) Modelación mediante ecuaciones diferenciales.
    - b) Separación de variables.
    - c) Campos de direcciones.
    - d) Método de Euler.
    - e) Existencia y unicidad de soluciones.
    - f) Equilibrios y línea de fase.
    - g) Bifurcaciones.
    - h) Ecuaciones diferenciales lineales.
    - i) Cambio de variables.

## 2. Sistemas de primer orden

- a) Modelación mediante sistemas
- b) Geometría de los sistemas
- c) Métodos analíticos para sistemas especiales.
- d) Método de Euler para sistemas.
- e) Ecuaciones de Lorenz.

## 3. Sistemas lineales

- a) Principio de linealidad
- b) Soluciones de línea recta.
- c) Planos fase para sistemas lineales con eigenvalores reales.
- d) Eigenvalores complejos.
- e) Casos especiales: eigenvalores repetidos y cero.
- f) Ecuaciones lineales de segundo orden.
- g) El plano traza-determinante.
- h) Sistemas lineales tridimensionales.

### A.2.2. Referencias

1. Blanchard, Paul, Robert L. Devaney y Glen R. Hall (1999): *Ecuaciones diferenciales*. México. International Thomson.
2. Coombes, Kevin R. et al. (1996): *Differential equations with Maple*. Nueva York, John Wiley & Sons.
3. Golubitsky, Martin y Michael Dellnitz (2001): *Álgebra lineal y ecuaciones diferenciales con uso de MATLAB*. México, Thomson Learning.

## A.3. Nociones de análisis matemático

### A.3.1. Contenido

1. El continuo de los números.

2. El concepto de función.
3. Funciones elementales.
4. Sucesiones.
5. Inducción matemática.
6. Límite de una sucesión.
7. Más sobre límites.
8. El concepto de límite de una función de variable continua.
9. Los límites y el concepto de número.
10. Teoremas sobre la continuidad de funciones.

### A.3.2. Referencias

1. Abbott, Stephen (2010): *Understanding Analysis*. Nueva York, Springer Verlag.

# Bibliografía

- [1] Allen, Peter M. (2001): “The Dynamics of Knowledge and Ignorance: Learning the New Systems Science” en *Integrative Systems Approach to Natural and Social Dynamics*. (Matthies, M.; H. Malchow y J. Kriz, Editores). Berlín, Springer (pp. 3-29).
- [2] Anderson, Phillip W. (1972): “More is Different” en *Science*, **177:4047**, 4 de agosto de 1972: 393-396.
- [3] Asamblea Legislativa del Distrito Federal (2004-2005). *Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México*. Aprobada por la Asamblea Legislativa del Distrito Federal el 16 de diciembre de 2004 y publicada en *Gaceta Oficial del Distrito Federal* el 5 de enero de 2005. México, UACM. 32 pp.
- [4] Cocho Gil, Germinal (1975): “Algunos aspectos de la termodinámica de la vida” en *El origen de la vida*. Simposio conmemorativo en homenaje a Alexander Ivánovich Oparin. México, UNAM.
- [5] Goldenfeld N. y L. Kadanoff (1999): “Simple Lessons from Complexity”, en *Science* **284**, pp. 87-89.
- [6] González Casanova, Pablo (2004): *Las nuevas ciencias y las humanidades. De la academia a la política*. Barcelona, Anthropos, 478 pp.
- [7] Gould, Stephen Jay (2002): “When Less is Truly More” en *I Have Landed: the End of a Beginning in Natural History*. Nueva York. Harmony Books. (pp. 225-228).
- [8] Grupo de discusión UNAM-UCM (2002): *Programa de la Maestría en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos*. México, UCM, 94 pp.

- [9] Haken, Hermann (1978): *Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Springer Series in Synergetics, Volumen **1**. Berlín, Springer-Verlag.
- [10] Kant, Immanuel (1961): *Crítica del juicio*. (Traducción de J. Rovira Armengol). Buenos Aires, Losada, 344 pp.
- [11] Miramontes, Octavio (1999): “Los sistemas complejos como instrumentos de copnocimiento y transformación del mundo”, en *Perspectivas en las teorías de sistemas*. (Santiago Ramírez, Coordinador). México, CEIICH-UNAM-Siglo XXI. Colección Aprender a Aprender, pp: 83-92.
- [12] Prigogine, Ilya y P. Glansdorff (1971): *Structure, stabilité et fluctuations*. París. Masson et Cie. Éditeurs.
- [13] Waddington, Conrad Hal (1977): *Tools for Thought. How to Understand and Apply the Latest Scientific Techniques of Problem Solving*. Nueva York. Basic Books Inc. Publishers.