

Ciencias de la Complejidad
Programa de Maestría

Grupo de Trabajo UNAM-UACM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO
Invierno de 2012

Índice general

I	Fundamentación	13
1.	Los objetivos de la UACM	15
1.1.	El problema de los valores	16
1.2.	Obsolescencia y cambio rápido	17
1.3.	La interdisciplina	18
1.4.	El cambio lento	20
2.	Una cosmovisión	23
2.1.	La revolución científica	24
2.2.	Los sistemas complejos	27
2.3.	La dinámica no lineal	30
2.4.	Consecuencias de esta cosmovisión	33
II	El programa	37
3.	Objetivos y perfiles	39
3.1.	Objetivos	39
3.1.1.	El objetivo general	39
3.2.	El perfil del egresado	40
3.3.	El perfil de ingreso	42
3.3.1.	Perfil A	42
3.3.2.	Perfil B	42
3.4.	Requisitos de ingreso	43
3.5.	Tiempo para cubrir el Plan de Estudios	44
3.6.	Requisitos para obtener el grado	44
3.7.	Plan de evaluación y actualización del programa	45
3.8.	De la infraestructura	45

4. Mapas curriculares	47
4.1. Líneas y mapas	48
4.2. De la discusión de los contenidos	51
4.3. Del perfil de los profesores	53
5. Líneas de generación o aplicación de conocimiento	55
III Contenidos	57
6. Ciencia y sociedad (Opciones A y B)	59
6.1. Presentación	59
6.2. Ciencia y Sociedad I	61
6.2.1. Objetivos	62
6.2.2. Temario	62
6.3. Ciencia y Sociedad II	64
6.3.1. Objetivos	64
6.3.2. Temario	64
6.4. Taller de Complejidad	66
6.4.1. Problemas específicos de la Ciudad de México	67
6.4.2. Política organizativa	67
6.4.3. Herramientas de representación y análisis	68
6.5. Bibliografía de la línea	69
7. Dinámica no lineal (Opción A)	73
7.1. Temario de Dinámica no Lineal I	74
7.2. Temario de Dinámica no Lineal II	76
7.3. Temario de Dinámica no Lineal III	78
7.4. Bibliografía de la línea	80
7.4.1. Sistemas deterministas	80
7.4.2. Procesos estocásticos	81
8. Fenómenos no lineales (Opción B)	83
8.1. Temario de Introducción a los Sistemas Dinámicos	83
8.2. Temario de Introducción a la Dinámica no Lineal	85
8.3. Bibliografía de la línea	86
8.3.1. Lecturas sugeridas	87
8.3.2. Páginas de interés en internet	89

9. Sistemas complejos (Opción A)	91
9.1. Temario de Sistemas Complejos I	92
9.2. Temario de Sistemas Complejos II	95
9.3. Bibliografía de la línea	97
9.3.1. Caos	97
9.3.2. Fractales	100
9.3.3. Complejidad	101
9.3.4. Para el Taller de Complejidad	104
10. Complejidad (Opción B)	117
10.1. Temario de Complejidad I	117
10.2. Temario de Complejidad II	119
10.3. Temario del Taller Propedéutico de Modelación	120
10.4. Bibliografía de la línea	122
11. Seminarios finales	125
11.1. Seminario de Investigación	125
11.2. Seminario de Tesis	125
IV Apéndices	127
A. Asignaturas opcionales sin valor curricular	129
A.1. Procesos Estocásticos	129
A.2. Inglés	130
B. De los cursos de apoyo	133
B.1. Álgebra superior y álgebra lineal	133
B.1.1. Contenido	133
B.1.2. Referencias	134
B.2. Ecuaciones diferenciales	134
B.2.1. Contenido	134
B.2.2. Referencias	135
B.3. Nociones de análisis matemático	135
B.3.1. Contenido	135
B.3.2. Referencias	136

Presentación

El plan de estudios de la Maestría en Ciencias de la Complejidad (MCC) que se presenta en este documento es una actualización del de la Maestría en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos (MDNLYSC) que se ofrecía en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM). Si bien los antecedentes se describen con detalle en las siguientes dos secciones, importa destacar que, el de la MDNLYSC, fue un programa pionero en América Latina y que la mayor aportación de este nuevo plan es que, sobre la base de aquél, se ha diseñado especialmente para ofrecer formación de posgrado en ciencias de la complejidad a profesionistas e investigadores de muy distintas áreas del conocimiento y no sólo a quienes poseen los conocimientos del curriculum matemático de las licenciaturas en ciencias físico-matemáticas o afines.

Las ciencias de la complejidad han surgido en los últimos veinticinco o treinta años como herramienta para entender procesos cuyo estudio no puede reducirse al de sus componentes. Como se expone ampliamente en la sección 2.4 de este documento, su desarrollo ha dado lugar a la constitución de grupos de trabajo en los grandes centros de investigación del mundo que aplican la teoría de los sistemas complejos a la búsqueda de soluciones en muy distintos campos del conocimiento. En particular, sus avances en relación con el estudio de lo biológico y lo social –en donde es posible reconocer propiedades que emergen merced a la acción colectiva de muchas componentes relativamente indiferenciadas, modelarlas matemáticamente o simularlas computacionalmente– ha propiciado el interés de los estudiosos que hallan, en este nuevo instrumental para el pensamiento, recursos de investigación novedosos y sugestivos.

Así, las ciencias de la complejidad son un espacio para el trabajo interdisciplinario; un lugar de encuentro donde se tiene la posibilidad de conjuntar el interés de estudiosos de la vida, lo social y lo humano, en sus distintos niveles de organización, con técnicos y científicos cuyo lenguaje y método

de investigación fundamental es la matemática; en este espacio, el diálogo y la colaboración es fundamental: el segundo grupo aporta su capacidad para comprender y aplicar el análisis matemático de los sistemas dinámicos no lineales, soporte de la teoría de los sistemas complejos; el primero, juzga la pertinencia de las propuestas teóricas sobre la base de su conocimiento del campo en que se quiere aplicarlas y realimenta la búsqueda conjunta.

Por el vigor con que se desarrollan las ciencias de la complejidad en el mundo, por las posibilidades que ofrecen para buscar soluciones a los ingentes problemas de la Ciudad de México y del país, es preciso impulsar la formación de investigadores y de profesionistas capaces de incorporar sus conceptos, métodos y resultados en sus campos de trabajo.

Esta necesidad quedaba de manifiesto en la demanda de ingreso a la Maestría en Dinámica no Lineal y Sistemas Complejos de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México: además de los solicitantes con formación en física, matemáticas, ciencias de la computación y carreras afines, cuyas solicitudes constituían, grosso modo, el 30% de las que se presentaban, se registraba un número creciente de solicitudes de ingreso de aspirantes con licenciaturas, por ejemplo, en administración, antropología, biología, ciencia política, economía, medicina o sociología.

Para atenderlos, en este nuevo programa:

1. Se establecen perfiles de ingreso diferenciados según la licenciatura de origen (véase la sección 3.3, *infra*).
2. En consecuencia, se adecúa el perfil del egresado (véanse los incisos 3 y 5 de la sección 3.2, *infra*).
3. Se presentan dos opciones curriculares diseñadas para cada perfil:
 - la A, para estudiantes con licenciatura en el área físico-matemática;
 - la B, para estudiantes con licenciatura en las áreas químico-biológicas y de la salud, económico y administrativas o sociales y humanísticas.

Los mapas curriculares se han organizado en tres líneas (véanse los cuadros 4.1 y 4.1): la de Ciencia y Sociedad es un tronco común mientras que los contenidos de las otras dos están orientados por las características particulares del perfil de egreso de cada opción.

El Plan de Estudios de la Maestría en Ciencias de la Complejidad fue aprobado por el Consejo Universitario de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México en 2012 y su primera generación ingresó en el segundo semestre de 2013.

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 programa¹ 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 personas²:

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

¹Véase [8].

²Tanto 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.

- 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 tareas³.

La segunda versión del documento maestro

Sobre la base del original, la Academia de la MDNLYSC ha reelaborado el programa y en este trabajo han participado –además de Germinal Cocho, José Luis Gutiérrez, Juan Luis Martínez, Pedro Miramontes y Faustino Sánchez– las siguientes personas:

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

- 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 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.
- 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.

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.

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, se plantean los propósitos generales del programa (capítulo 3.1); se presentan los mapas curriculares (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.

En la tercera, se presentan los objetivos de aprendizaje de las líneas curriculares, los temarios por asignatura y la bibliografía correspondiente (capítulos 6, 7, 8, 9 y 10).

Los apéndices informan de los contenidos de los cursos de apoyo y de las asignaturas opcionales sin valor curricular.

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 MCC 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, ni los saberes tradicionales ni los avances científicos son adecuadamente valorados y se suele alimentar con ellos distintas formas de pensamiento mágico o usarlos 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 la sociedad y anula en mucho sus posibilidades de crítica.

La ciencia ha sido un instrumento de liberación de los seres humanos contra la superstición y la ignorancia; en muchos sentidos, sus avances han contribuido a mejorar la calidad de vida de los pueblos 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 social-

mente; además, la tendencia pragmática y utilitaria que induce, en la educación superior, a 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 MCC tiene el propósito de propiciar la educación de profesionales 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 profesionales 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 académica, humanística, técnica y científica inimaginable hace cincuenta años, se multiplican con rapidez similar.

Según el científico británico C. H. Waddington¹, 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 anual-

¹Conrad 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 [14], una obra póstuma, establece alguna de sus características generales.

mente (*Cfr.* [14], p. 34) de manera que la información especializada ya era, entonces, absolutamente inabarcable; es evidente que ningún ser humano puede apropiarse de tal cantidad de resultados y esto 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 [14], p. 36-37):

[...] Presumiblemente, la solución consiste en: (a) enseñar principios generales que se hagan obsoletos sólo muy lentamente²; (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 MCC 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 o profesionales 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

²Véase la sección 1.4, en la p. 20, *infra*.

la fragmentación del conocimiento con proyectos educativos innovadores como el del Colegio de Ciencias y Humanidades³ 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 lugares 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 maestros 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

³En 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.

múltiples entre los más diversos campos de conocimiento y sus aplicaciones; 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 MCC 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, propicia para el descubrimiento o la invención de 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 MCC 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

Las ciencias de la complejidad implican un cambio profundo en la visión del mundo surgida de la revolución científica de los siglos XVII y XVIII, dominante hasta el último tercio del siglo pasado y consolidada, en particular, merced al extraordinario avance, sobre todo, de las ciencias naturales.

En buena medida, las limitaciones de la educación tradicional descritas en la sección 1.1 son consecuencias de aquella visión 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 fue 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 tiempo¹, fruto maduro del racionalismo², la actitud ante la vida asociada con esta doctrina a lo largo del Siglo de las Luces y la vertiente artística y cultural de la Ilustración. La mecánica tenía, a finales del XVIII, un enorme prestigio respaldado por su capacidad predictiva, su impresionante unificación de la física de los cielos con la de la tierra y 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 días³.

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

¹Llamada “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.

²Doctrina filosófica para la cual es posible acceder, mediante el uso de la razón, al conocimiento de la realidad, a descubrir cómo se ordena y estructura y a postular leyes que la rigen

³Se dice de esta cosmovisión que es propia del mecanicismo reduccionista y lineal

totalidad. Por referirnos a un caso muy reciente, el conocimiento detallado 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 casa⁴.

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

⁴En *La ciencia y la hipótesis*, un texto de 1908 (puede consultarse la edición inglesa [12]), 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.

de partículas respecto a la naturaleza de las leyes fundamentales, 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.

X	Y
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 .

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 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 pero que pueden agruparse bajo el nombre genérico de “estructuras disipativas o sistemas abiertos, alejados del equilibrio termodinámico”; por ejemplo, en

- 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 disciplinario en alcances y aplicaciones, es preciso establecer una teoría interdisciplinaria e integradora, cualitativa y dialéctica; capaz de trascender el estudio de “las partes” para convertirse en un aparato capaz de 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 donde aborda –en los ámbitos de la física, la química y la biología– estos temas, el Profesor Hermann Haken⁵, investigador pionero 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 es posible encontrar procesos de autoorganización en sistemas inanimados más simples.

Esto requiere, en la terminología de C. H. Waddington, un nuevo instrumental para el pensamiento que nos permita trazar y seguir el camino de regreso: de los componentes básicos al todo, al menos de un nivel de organización a otro –el inmediato superior, por ejemplo pero no necesariamente–, 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

⁵Hermann 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.

los especialistas; y aunque sigue habiendo sutiles pero importantes diferencias entre ellos⁶, Octavio Miramontes lo ha caracterizado así (véase [11], p. 84):

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

⁶La discusión excede el alcance de este documento pero las controversias han de hacerse evidentes en el desarrollo de las líneas curriculares de ciencia y sociedad y de sistemas complejos (véanse, respectivamente, las secciones 6 y 9, *infra*).

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.

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 que permiten distinguir del azar, sin duda alguna, el comportamiento del sistema.

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 disímbola (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.* [13]).

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.

La teoría de los sistemas complejos no sólo ha acercado las ciencias naturales a las disciplinas humanísticas y las ciencias sociales; no nada más tendió puentes entre ellas y ha prestado así un servicio mayor a la cultura; de hecho, al abordar el estudio de los procesos colectivos y sus propiedades emergentes en las más diversas formas de organización de la materia ha dado lugar, en las “ciencias de la complejidad”, a nuevas formas de aproximarse a la comprensión del mundo y, 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 sistemas 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 relativas a 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. Allen⁷, (*Cfr.*[1], p. 3) dice:

⁷Peter Allen es profesor de sistemas complejos evolutivos en la Cranfield School of

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, permanentemente, 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.

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>.

- En México, desde principios de los años setenta del siglo pasado – 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 y perfiles

3.1. Objetivos

3.1.1. El objetivo general

El programa de la MCC tiene el propósito de propiciar que los profesionistas de distintos campos que se formen en él desarrollen aptitudes para la investigación en ciencias de la complejidad orientadas a y aplicables en sus respectivos campos de interés y congruentes con los objetivos de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México establecidos en su *Ley*¹.

Lograr el propósito general implica que quienes accedan al programa deberán

1. Comprender los fundamentos, alcances y significado de la modelación de procesos y fenómenos no lineales como herramienta de representación necesaria en la solución de problemas;
2. Identificar en la realidad las posibilidades de aplicar la teoría de los sistemas complejos a la comprensión de procesos físicos, biológicos o sociales que tengan lugar en su ámbito de trabajo.
3. 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

¹Véase el capítulo 1 de este documento.

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.
- transformar su práctica profesional para contribuir a resolver los problemas de la gente, recuperando para ella el bien social que es la ciencia.

Los objetivos particulares de la MCC en relación con la formación de sus egresados se describen en la sección 3.2.

3.2. 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 se capacitarán para trabajar en la operación o toma de decisiones de instancias académicas públicas o privadas, institutos de investigación científica o técnica, instituciones de salud, organismos civiles o internacionales, empresas o secretarías de gobierno locales o federales donde:

1. Identificarán procesos representables como sistemas complejos en la naturaleza y la sociedad.
2. Reconocerán, sobre la base del principio de modularidad de los sistemas complejos², la necesidad de establecer un nivel adecuado de análisis para modelarlos.
3. Incorporarán a su cultura científica el conocimiento de cómo se construyen modelos –mediante sistemas dinámicos no lineales (SDNL)– de procesos físicos, biológicos y sociales en los cuales se presentan fenómenos críticos. En particular, quienes se formen

²Este principio establece que la emergencia de propiedades globales en cierto nivel (o módulo) de organización de la materia, surge merced a las interacciones de los elementos de algún subsistema y que, de ser necesario, éste debe considerarse otra entidad modular.

- a)* en la opción A de este plan de estudios, comprenderán cabalmente los formalismos matemáticos involucrados;
 - b)* en la opción B, comprenderán el significado dinámico de los términos de cada modelo.
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. En particular, quienes se formen
 - a)* en la opción A de este plan de estudios, podrán construir los modelos desde sus supuestos y aplicar los fundamentos teóricos del análisis de sistemas dinámicos no lineales para deducir sus consecuencias y establecer sus limitaciones;
 - b)* en la opción B, aportarán elementos fenomenológicos para la construcción de los modelos y podrán evaluar la pertinencia de los resultados.
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 los fundamentos de la teoría de los sistemas complejos.
8. Tendrán las bases necesarias para proseguir su formación en ciencias de la complejidad 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 y aplicar la visión integradora –científica, humanística y social– de la teoría de los sistemas complejos.

3.3. El perfil de ingreso

Por su carácter interdisciplinario y en concordancia con las orientaciones curriculares de este plan de estudios³, se establecen dos perfiles de ingreso a la MCC según la formación matemática que tengan quienes deseen formarse en ella. En ambos casos, no obstante, se requiere dominio suficiente del inglés para comprender sin dificultad textos científicos y académicos en ese idioma (desde artículos técnicos hasta ensayos filosóficos).

3.3.1. Perfil A

Quienes deseen ser alumnos de la MCC 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.

3.3.2. Perfil B

Quienes deseen ser alumnos de la MCC deben poseer los siguientes conocimientos de matemática básica (a nivel de bachillerato):

1. Álgebra y trigonometría.
2. Geometría analítica.
3. Nociones de cálculo diferencial e integral.

³Véase la sección 4.1, *infra*.

3.4. Requisitos de ingreso

Quien aspire a ingresar como estudiante del programa de MCC deberá

1. Poseer título de licenciatura.
2. Mostrar, mediante una evaluación diagnóstica, que
 - a) posee los conocimientos matemáticos correspondientes al perfil descrito en la sección 3.3.1 o a los de la sección 3.3.2 de este documento y
 - b) comprende textos (ensayos académicos, científicos, técnicos o filosóficos) en inglés. El instrumento de evaluación de la comprensión de textos será diseñado, aplicado y evaluado por la Academia de Idiomas de la UACM en el Plantel del Valle.
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 el Claustro Académico de la MCC. En la entrevista, el Comité comunicará al candidato:
 - a) el resultado de la evaluación diagnóstica, indicándole cuáles fueron sus fortalezas y debilidades;
 - b) si está apto para ingresar y en cuál de las dos orientaciones curriculares se le recomienda que inicie su formación en la maestría;
 - c) en su caso, 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 apoyo⁴ cuyos contenidos se dan en el apéndice B 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.

⁴Estos 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, “desempolvase” o repasar. No son propedéuticos.

3.5. Tiempo para cubrir el Plan de Estudios

Como puede verse en los mapas curriculares (confróntense en el capítulo 4, *infra*), si el estudiante le dedica tiempo completo, el Plan de Estudios está diseñado para ser cubierto en cuatro semestres. Con dedicación parcial, podrá cubrirse en más tiempo pero los estudiantes que tuvieren beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la posible adscripción de la MCC al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) deberán graduarse en un tiempo máximo de dos años después de su ingreso aunque podrán, excepcionalmente, disponer de un semestre adicional como extensión temporal máxima para la conclusión del programa.

Al ingresar a la MCC, el Claustro Académico responsable del Programa le asignará a cada estudiante un *Comité Tutorial*, compuesto por tres profesores-investigadores de la UACM. Este Comité será responsable de acompañar, orientar y dar seguimiento al alumno durante su formación en la Maestría. En el caso de los estudiantes que tengan beca del CONACYT, al menos dos de los miembros del Comité deberán pertenecer al Núcleo Básico registrado en el PNPC.

3.6. Requisitos para obtener el grado

La Universidad Autónoma de la Ciudad de México otorgará el título de *Maestro o Maestra en Ciencias de la Complejidad* 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 Claustro Académico responsable de la Maestría en Ciencias de la Complejidad. El título de quienes hayan optado por la orientación curricular A, además, ostentará la distinción de haberlo hecho en el *Área de Concentración en Dinámica no Lineal*.

Para ser candidato a optar por el grado, es indispensable haber obtenido los certificados de que se poseen los conocimientos de la totalidad de las asignaturas obligatorias de la opción en la que se haya inscrito el estudiante. La certificación se llevará a cabo mediante los procedimientos generales establecidos por la Universidad y la evaluación deberá hacerse sobre la base y en apego a los objetivos y contenidos descritos en este Plan de Estudios.

3.7. Plan de evaluación y actualización del programa

Para establecer criterios claros de evaluación, los responsables se asesorarán con las instancias de apoyo académico de la UACM.

1. Al final de cada semestre, los alumnos y los profesores de la MCC llevarán a cabo un ejercicio en el que evaluarán, además de los que se consideren pertinentes en su momento, los siguientes aspectos:
 - a) El logro de los objetivos de las líneas curriculares.
 - b) Las contradicciones y la congruencia entre los contenidos y las estrategias de aprendizaje.
 - c) El funcionamiento general y específico de la estructura curricular adoptada.
 - d) La operación del programa.
 - e) El cumplimiento del cuerpo docente.

2. Además,
 - a) Por ser un área del conocimiento en desarrollo permanente y muy acelerado, los contenidos de este Plan de Estudios se actualizarán cada año, incorporando en ellos los desarrollos más recientes del área correspondiente, y su estructura general se someterá a evaluación cada tres⁵.
 - b) El desempeño de la MCC deberá ser evaluado por el Consejo Social Consultivo previsto en la Ley de la Universidad en los términos en que lo señale el Estatuto General Orgánico y la normatividad de la misma.

3.8. De la infraestructura

El Plantel del Valle de la UACM es la sede de la MCC cuya infraestructura es suficiente para atender la demanda de espacios para el ejercicio de la

⁵Según lo requiere el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

docencia y la difusión de la cultura. En el caso de la MCC, la parte medular de los proyectos de investigación que podrían desarrollar los estudiantes, se satisface con el equipo de cómputo disponible y el uso de *software* libre. Asimismo, en el acervo de la biblioteca del Plantel se encuentra la mayor colección de textos especializados en sistemas dinámicos y complejidad de la UACM.

Capítulo 4

Mapas curriculares

Toda organización curricular implica y es expresión de una filosofía. En el caso del programa de la MCC –como se expuso *in extenso* en los capítulos 1 y 2, respectivamente– es resultante de la concepción del proyecto educativo de la UACM y conlleva la cosmovisión de los sistemas complejos.

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 sociales¹.

Esto ha hecho que científicos sociales y humanistas se interesen en comprender sus fundamentos y han descubierto, en el trabajo interdisciplinario con científicos naturales y matemáticos, todo un cuerpo de conocimientos que hoy se ubica bajo el nombre genérico de *ciencias de la complejidad*.

Como se establece en la sección 3.3 de este documento, el plan de estudios se ha diseñado considerando las diferencias en la formación matemática de los interesados en cursarlo y, por ello, se ofrecen dos orientaciones curriculares correspondientes a los perfiles de ingreso establecidos.

Además, el programa está directamente relacionado con modelos matemáticos de procesos no lineales en distintas escalas de organización de la materia;

¹Véase, en particular, la cita de Herman Haken en la p. 30, *supra*.

los contenidos de las líneas curriculares se han establecido para que quienes cursen

- la opción A,
 - construyan los modelos con las herramientas adecuadas de representación y análisis no lineal;
 - interactúen con profesionales de los campos de estudio de los procesos representados para juzgar su pertinencia;
 - replanteen los modelos cuando sea necesario, con base en la colaboración del trabajo interdisciplinario;

- la opción B,
 - comprendan el lenguaje, las hipótesis y las limitaciones de los modelos;
 - sean capaces de utilizar simuladores y apoyos computacionales para calibrar y juzgar la pertinencia de los modelos;
 - colaboren con quienes hayan construido los modelos para su reelaboración cuando sea necesario.

4.1. Líneas y mapas

Cada mapa se ha organizado con base en tres grandes líneas curriculares: la de Ciencia y Sociedad (Cys) es común a ambas opciones y se concibe como el espacio de trabajo interdisciplinario de estudiantes y profesores. En ambos casos, la separación en líneas y asignaturas es metodológica; al cabo, hay una urdimbre subyacente a todo el programa que le da unidad y coherencia y se entrama alrededor del concepto fundamental de que todos los sistemas complejos presentan la propiedad de autoorganización hacia la zona crítica².

Para la opción A, las otras dos líneas son: la de Sistemas Complejos (SC) y la de Dinámica no Lineal (DNL).

A su vez, las otras dos líneas de la opción B son la de Complejidad (C) y la de Fenomenología de la no linealidad (FNL).

²SOC por su sigla en inglés: *Self-Organized Criticality*.

En los cuadros 4.1 y 4.1 se informa de la programación semestral de cada opción curricular; se describe sucintamente el contenido de las asignaturas y en los capítulos 6, 9 y 7 se desglosan los contenidos temáticos de las mismas. Cada semestre tiene una duración de dieciséis semanas.

Conviene insistir en las relaciones horizontales de los dos mapas curriculares: es cierto que hay una separación en líneas que se distinguen entre sí 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.

Sem	ASIGNATURAS		
1ero	Ciencia y Sociedad I Evolución histórica del concepto de complejidad 4.5 h/semana	Sistemas Complejos I Autoorganización hacia la zona crítica y sistemas excitables 6 h/semana	Dinámica no Lineal I Sist. continuos: estabilidad Sistemas discretos: mapeos fractales y caos. 6 h/semana
2do	Ciencia y Sociedad II Criticalidad en procesos de la vida y la sociedad 4.5 h/semana	Sistemas Complejos II Redes, autómatas, agentes y series de tiempo 6 h/semana	Dinámica no Lineal II Sistemas. continuos Bifurcaciones y caos 6 h/semana
3ero	Taller de complejidad Problemáticas de la Ciudad de México 4.5 h/semana	Sem. de Investigación 3 h/semana	Dinámica no Lineal III Autoorganización espacio-temporal 4.5 h/semana
4to	Seminario de Tesis 3 h/semana		

Cuadro 4.1: Mapa de la opción curricular A.

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.

Sem	ASIGNATURAS		
1ero	Ciencia y Sociedad I Evolución histórica del concepto de complejidad 4.5 h/semana	Complejidad I Autoorganización hacia la zona crítica y autómatas celulares 6 h/semana	Fenómenos no lineales I Introducción a los sistemas dinámicos lineales y no lineales 6 h/semana
2do	Ciencia y Sociedad II Criticalidad en procesos de la vida y la sociedad 4.5 h/semana	Complejidad II Complejidad en redes, agentes y series de tiempo 6 h/semana	Fenómenos no lineales II Caracterización de la no linealidad: caos y complejidad 6 h/semana
3ero	Taller de complejidad Problemáticas de la Ciudad de México 4.5 h/semana	Sem. de Investigación 3 h/semana	Taller propedéutico De la teoría a la realidad: herramientas y modelos 6 h/semana
4to	Seminario de Tesis 3 h/semana		

Cuadro 4.2: Mapa de la opción curricular B.

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 la 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 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 los cuadros 4.1 y 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 discusión de los contenidos

Importa plantear algunas recomendaciones generales sobre la orientación del plan de estudios y la forma de abordar los contenidos temáticos atendiendo a la heterogeneidad de la formación de los estudiantes. En general, en la educación de licenciatura no se desarrollan las capacidades relacionadas con la modelación matemática descritas en la página 4 (*supra*) y las siguientes recomendaciones se plantean como un método posible para propiciar que los estudiantes las 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 términos 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 en 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 los siguientes:

- 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 tiende al caos.
3. A partir de la discusión de los temas del inciso anterior, con el enfoque descrito en el primero, 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 MCC– 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 transitar por los laberintos de la demostración formal de un teorema.

4.3. Del perfil de los profesores

Los académicos responsables de impartir los cursos, seminarios y talleres de este Plan de Estudios deberán ostentar el grado de Maestro o de Doctor y hayan hecho trabajo interdisciplinario de investigación y docencia, comprobable, en temas afines a los contenidos de las materias que impartan y que se describen en la parte III de este documento.

En particular, es necesario que los profesores encargados de

- las asignaturas de Dinámica no Lineal, Fenómenos no Lineales, Sistemas Complejos y Complejidad, tengan formación y trabajo profesional en física, matemáticas, ciencias de la computación o ingeniería;
- los seminarios de Ciencia y Sociedad, tengan formación científica y humanística y producción académica en filosofía o historia de la ciencia;
- el Taller de Complejidad, tengan la capacidad de construir modelos matemáticos y diseñar y ejecutar simulaciones computacionales de sistemas dinámicos continuos o discretos, desde la perspectiva de los sistemas complejos, relacionados con los problemas específicos que pudieren abordarse en el Taller.

Capítulo 5

Líneas de generación o aplicación de conocimiento

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 MCC 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 ?? de la página ??) 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.

Las líneas de investigación pueden agruparse en *dos líneas de generación o aplicación de conocimiento: Sociocomplejidad y Biología Teórica*; bajo estos dos rubros se enlistan los proyectos de investigación en los que se trabaja en la MCC tanto por miembros de su Claustro Académico como por colaboradores de otras instancias de la UACM y de la UNAM.

1. Sociocomplejidad

- a) Sociocomplejidad y simulación computacional de dinámicas sociales.
- b) Dinámica de la economía y los mercados financieros.
- c) Aplicaciones de la teoría de los sistemas complejos a la organización de los servicios públicos y la solución de problemas urbanos; por ejemplo:
 - 1) promoción de la salud y enfermedades complejas;
 - 2) red hidráulica;
 - 3) viabilidad y transporte;
 - 4) educación;
 - 5) sustentabilidad y medioambiente;
 - 6) seguridad.

2. Biología Teórica

- a) Dinámicas en conflicto, frustración y emergencia de patrones.
- b) Morfogénesis y evolución biológicas.
- c) Biología teórica.
- d) Genómica computacional y reconocimiento de patrones.
- e) Dinámica de medios excitables.
- f) Epidemiología, inmunología y ecología matemáticas.
- g) Modelos matemáticos de la evolución de genes y proteínas.
- h) Máquinas moleculares biológicas.
- i) Medioambiente y complejidad.

Asimismo, se lleva a cabo investigación de carácter general o aplicada a las líneas anteriores en

- Dinámicas en conflicto, frustración y emergencia de patrones.
- Modelos basados en agentes y cómputo neuronal
- Cómputo emergente y redes complejas.

Parte III

Contenidos

Capítulo 6

Ciencia y sociedad (Opciones A y B)

6.1. Presentación

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-militar¹ 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 y no siempre explícitas en las de humanidades y ciencias sociales– son necesarias para que quienes se formen en la MCC 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

¹Al que se refiere extensamente Pablo González Casanova en [6].

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 universales, 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 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 social²– 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, de aprender a resolver problemas o evolucionar; se dice que los sistemas com-

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

plejos “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 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. 55, *supra*) y cuyo temario se presenta en la sección 6.4 en (p. 66 y ss. *infra*). Como se ha dicho, ésta es la línea curricular común a las dos opciones.

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 apartados³ 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.

6.2. 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, la primera revolución industrial y las consecuencias políticas, económicas, sociales y culturales de estos grandes cambios; a partir de aquí se trata de explicar la transición que lleva de la visión del mundo

³Véanse los incisos 1 y 2 de la sección 6.2 y los incisos 1 y 2 de la sección 6.3, *infra*

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.

6.2.1. Objetivos

En el primer curso de ciencia y sociedad, el estudiante,

1. Identificará cómo han evolucionado las concepciones de lo simple y lo complejo desde la filosofía de la Antigüedad Clásica hasta nuestros días.
2. Reconocerá que, en diferentes etapas de la historia de las ideas, ha habido transiciones en las que tras una “crisis de la razón”, ha surgido una “nueva sensibilidad” y viceversa.
3. Reconocerá, en la crítica a la ciencia de nuestros días, semejanzas y diferencias con aquellos conflictos relacionados con las crisis de la razón a que se refiere el objetivo anterior.

6.2.2. Temario

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

- 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*.

6.3. Ciencia y Sociedad II

6.3.1. Objetivos

En el segundo curso se discuten fenómenos críticos en la naturaleza y la sociedad⁴ y el estudiante,

1. Identificará las características genéricas del comportamiento dinámico en zona crítica;
2. Aplicará la identificación del objetivo anterior a la interpretación de procesos de adaptación y aprendizaje en distintos sistemas naturales y sociales.

6.3.2. Temario

1. Transiciones críticas
 - a) La posibilidad de que existan diferentes estados estables. Algunos mecanismos
 - b) Ciclos y caos.
 - c) La emergencia de patrones en sistemas complejos.

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

- 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.

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

6.4.1. Problemas específicos de la Ciudad de México

Objetivos

Los participantes

1. Identificarán elementos de la dinámica de los procesos relacionados con cada problema y que pueden ser factores determinantes en su evolución.
2. 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.

6.4.2. Política organizativa

Objetivos

Los participantes

1. Identificarán cómo 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 6.4.1.
2. 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.

6.4.3. Herramientas de representación y análisis

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

Objetivos

Los participantes

1. 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.
2. Sobre la base de los objetivos correspondientes al módulo 6.4.1 y de la identificación anterior, plantearán hipótesis respecto a cómo emerge la complejidad en la dinámica de los problemas de la Ciudad de México.

3. 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.

6.5. 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/biomas/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 (Opción A)

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 A.1, *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 sillars.
 - 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 α y ω 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, transcritical 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, Hodgkin-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

1. Propagación de ondas en medios excitables.
 - a) Medios excitables y sus características.
 - 1) Transmisión de impulsos nerviosos.
 - 2) Los modelos continuos de Hodgkin-Huxley y de FitzHugh-Nagumo para neuronas.
 - b) Un modelo espacio-temporal.
 - c) Ecuaciones de reacción-difusión.
 - 1) Leyes de conservación y de Fick¹.

¹Deberá 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 1b y 3 del temario del curso complementario de Procesos Estocásticos (véanse, en el apéndice A.1, pp. 129 y ss.).

- 2) Modelación de procesos difusivos.
- d) Soluciones de tipo onda viajera.
 - 1) Análisis local y global.
 - 2) Ecuación de Fisher-KPP.
- 2. Auto organización y emergencia de patrones.
 - a) Estructuras disipativas y rompimientos de simetrías.
 - b) Patrones generados por ondas bi y tridimensionales.
 - 1) Reacción química de Belousov-Zhabotinski.
 - 2) Modelos de células cardíacas.
 - c) Patrones de vegetación y el modelo del Brusselator.
 - 1) Inestabilidad de Turing.
 - 2) Inestabilidad de Hopf.
 - d) Patrones en algunos sistemas físicos.
 - 1) Convección de Rayleigh-Bénard y la ecuación de Swift-Hohenberg.
 - 2) El sistema oscilante de Faraday y la ecuación de Ginzburg-Landau.
 - e) Morfogénesis, quimiotaxis y filotaxia.
 - f) Coexistencia de patrones regulares y caos.
- 3. Solitones.
 - a) Ecuaciones de solitones y sus soluciones (de Korteweg-de Vries, Schrödinger no lineal, sine-Gordon, etcétera).
 - b) Técnicas de solución (dispersión inversa y métodos numéricos).
 - c) Construcción y formación de solitones.
 - d) Sistemas físicos que exhiben solitones: ondas de agua superficiales, cristales líquidos, fibras ópticas, sistemas magnéticos, etcétera.

7.4. 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).

7.4.1. 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).

7.4.2. 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

Fenómenos no lineales (Opción B)

El alumno comprenderá aspectos conceptuales de la teoría de los sistemas dinámicos discretos y continuos; específicamente, los concernientes a los fundamentos del análisis cualitativo de la estabilidad, las bifurcaciones y el comportamiento caótico de las soluciones de sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias (SEDO) y los sistemas de ecuaciones en diferencias (SED) no lineales. Consecuentemente, con base en representaciones geométricas y el manejo de programas de cómputo específicos, el alumno podrá determinar cualitativamente las implicaciones de estos conceptos en modelaciones de procesos sociales, biológicos y físicos basadas con este enfoque.

8.1. Temario de Introducción a los Sistemas Dinámicos

1. Introducción.

- a) Introducción a los modelos y representaciones matemáticas de procesos sociales, biológicos y físicos, basados en sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias (dinámica continua) y en diferencias (dinámica discreta).
- b) Discusión de los conceptos básicos de relación de recurrencia, derivada, antiderivada (y algunas reglas básicas), de ecuación diferencial ordinaria (EDO) y de ecuación en diferencias (ED), así como los

de serie de tiempo, campo de pendientes, línea de fase, solución estacionaria, fuentes y sumideros en el contexto de modelos de crecimiento poblacional discretos (lineal y logístico) y continuos (Malthus y Verhulst).

- c) Discusión de los conceptos de punto fijo, puntos periódicos y diagrama de telaraña para ED, en el contexto del modelo logístico.
- d) Uso de la computadora para la solución analítica, cualitativa y numérica de las EDO y ED.
- e) Implicaciones prácticas del teorema de existencia y unicidad.
- f) Sesiones complementarias sobre modelación.
 - 1) Otros modelos de crecimiento poblacional.
 - 2) Diseminación de innovaciones tecnológicas.
 - 3) La falsificación de obras de arte por Van Meegeren.
 - 4) Dinámica del desarrollo de tumores.
 - 5) Proyección del parque vehicular de la Ciudad de México.

2. Sistemas lineales.

- a) Discusión de los SEDO lineales en el contexto del modelo bidimensional de la relación amorosa de Romeo y Julieta de Strogatz.
- b) Geometría de las soluciones, de puntos de equilibrio, campo de direcciones, soluciones de línea recta, fuentes, sumideros y sillas.
- c) De la geometría al álgebra de las soluciones de línea recta: notación matricial, determinante, ecuación característica, eigenvalores y eigenvectores.
- d) El plano traza-determinante.
- e) Geometría de las soluciones de SEDO lineales tridimensionales.
- f) Discusión de los SED lineales en el contexto del modelo de Leslie.
- g) Uso de la computadora para la solución analítica, cualitativa y numérica de los SEDO y SED lineales.
- h) Sesiones complementarias sobre modelación.
 - 1) Un problema de cría de conejos: La sucesión de Fibonacci.
 - 2) Procesos recurrentes en economía: El modelo de Samuelson.

- 3) Un modelo para la detección de la diabetes.
- 4) Teorías matemáticas de la guerra.
- 5) Píldoras para el resfriado.

8.2. Temario de Introducción a la Dinámica no Lineal

1. Sistemas no lineales

- a) Discusión de los SEDO en el contexto de la modelación de interacciones específicas tipo depredador-presa o de competencia.
- b) Descripción cualitativa de la estabilidad de las soluciones de los SEDO en la vecindad de sus puntos de equilibrio.
- c) Discusión de las características cualitativas de los ciclos límite.
- d) Uso de la computadora para la solución analítica, cualitativa y numérica de los SEDO y los SED no lineales.
- e) Sesiones complementarias sobre modelación:
 - 1) Modelos presa-depredador modificados.
 - 2) Epidemiología: el modelo SIR de Kermack y McKendrick
 - 3) Un modelo de la dinámica del amor de Petrarca por Laura.
 - 4) Reacciones químicas: el modelo *Brusselator*.
 - 5) El péndulo doble.

2. Bifurcaciones y caos

- a) SEDO y SED dependientes de un parámetro y cambios cualitativos en sus soluciones.
- b) Caos en SED en el contexto del mapeo logístico.
 - 1) Sensibilidad a las condiciones iniciales y densidad de la imagen.
 - 2) Ruta al caos por duplicación de períodos.
 - 3) Taller de experimentación computacional con mapeos caóticos.

- c) Caos en SEDO tridimensionales en el contexto del modelo de Lorenz.
 - 1) Efecto mariposa.
 - 2) La geometría de los atractores extraños.
- d) Sesiones complementarias sobre modelación
 - 1) Dinámica de una cuenta ideal que se desliza en un aro giratorio.
 - 2) Ciclos bifurcados en el modelo keynesiano.
 - 3) Los atractores extraños de Rossler, Chua y Hodgkin-Huxley.
 - 4) Modelos económicos caóticos.
 - 5) Osciladores no lineales forzados.

8.3. Bibliografía de la línea

1. Abraham, R.H. y C.D. Shaw. (1992): *The Geometry of Behavior*. Second Edition. Addison-Wesley.
2. Acheson, D. (1998): *From Calculus to Chaos. An Introduction to Dynamics*. Nueva York, Oxford University Press.
3. Barnes, B. y G.R. Fulford (2002): *Mathematical Modeling With Case Studies: A Differential Equations Approach Using Maple*. Nueva York, CRC.
4. Beltrami, E. (1987): *Mathematics for Mathematical Modeling*. Orlando, Academic Press.
5. Blanchard, Paul; Robert L. Devaney y Glen R. Hall (1998): *Ecuaciones Diferenciales*. México, International Thomson Editores.
6. Borrelli, R.L. y C.S. Coleman (2005): *Ecuaciones diferenciales. Una perspectiva de modelación*. México, Oxford-AlfaOmega.
7. Braun, Martin (1990): *Ecuaciones diferenciales y sus aplicaciones*. México, Grupo Editorial Iberoamérica.
8. Brown, C. (1995): *Chaos and Catastrophe Theories*. Series: Quantitative Applications in the Social Sciences 107. Sage Publications.

9. Davis, J.H. (2001): *Differential Equations with Maple. An Interactive Approach*. Boston, Birkhauser.
10. Huckfeldt, R.R.; C.W. Hohfeld y T.W. Likens (1982): *Dynamic Modeling. An Introduction*. Series: Quantitative Applications in the Social Sciences 27. Beverly Hills, California, Sage.
11. Gutiérrez Sánchez, J.L. y Faustino Sánchez Garduño (1998): *Matemáticas para las Ciencias Naturales*. México, Sociedad Matemática Mexicana, Aportaciones matemáticas. Textos **11**.
12. Kaplan, D. y L. Glass (1995): *Understanding Nonlinear Dynamics*. Nueva York, Springer Verlag.
13. Lomen, D. y D. Lovelock (2000): *Ecuaciones Diferenciales a través de gráficas, modelos y datos*. México, CECSA.
14. Lynch, S. (2001): *Dynamical Systems with Applications using Maple*. Boston, Birkhauser.
15. Pérez-Cacho García, S.; F. M. Gómez Cubillo y J. M. Marbán Prieto, (2002): *Modelos matemáticos y procesos dinámicos. Un primer contacto*. Valladolid, Universidad de Valladolid.
16. Strogatz, S.H. (2000): *Nonlinear Dynamics and Chaos with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Westview Press.
17. Williams, G.P. (1997): *Chaos Theory Tamed*. Joseph Henry Press.

8.3.1. Lecturas sugeridas

1. Amelkin, V. (1987): *Ecuaciones diferenciales aplicadas a la práctica*. Moscú, Mir.
2. Bertalanffy, Ludwig von (1995): *Teoría general de los sistemas*. México, Fondo de Cultura Económica.
3. Braun, Eliezer (1996): *Caos, fractales y cosas raras*. México, Fondo de Cultura Económica. Serie La ciencia desde México **150**.

4. Briggs J. y F. D. Peat (1990): *Espejo y reflejo: del caos al orden*. Guía ilustrada de la teoría del caos y la ciencia de la totalidad. Barcelona, Gedisa.
5. Courant, Richard y Herbert Robbins, (1967): *¿Qué es la matemática? Una exposición elemental de sus ideas y métodos*. Madrid, Aguilar.
6. Diacu, Florin y Philip Holmes (1996): *Celestial Encounters. The Origins of Chaos and Stability*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
7. Efros, A. (1987): *Física y geometría del desorden*. Moscú, Mir.
8. Gleick, J. (2008): *Chaos: Making a New Science*. Nueva York, Penguin.
9. Lorenz, E.N. (1995): *The Essence of Chaos*, Seattle, University of Washington Press.
10. Nápoles Valdés, Juan E. (2004): “Un siglo de teoría cualitativa de ecuaciones diferenciales” en *Lecturas Matemáticas* **25**, Buenos Aires, Universidad de la Cuenca del Plata.
11. Prigogine, I. (2004): *Las leyes del caos*. Barcelona, Crítica.
12. Sanjuan, Miguel A.F. y José Manuel Casado Vázquez (2005): “Dinámica no lineal: orígenes y futuro”, en *Física para todos / Física no mundo*. Enero de 2005.
13. Schifter, I. (1996): *La ciencia del caos*. México, Fondo de Cultura Económica. Colección La ciencia para todos **142**.
14. Sometband, M.J. (1999) *Entre el orden y el caos: la complejidad*. México, Fondo de Cultura Económica. Colección La ciencia para todos **167**.
15. Talanquer, V. (1996): *Fractus, fracta, fractal. Fractales de laberintos y espejos*. México, Fondo de Cultura Económica. Serie La ciencia desde México **147**.
16. Stewart, Ian (2007): *¿Juega Dios a los dados?*. Barcelona, Crítica.

8.3.2. Páginas de interés en internet

1. *Chaos and Fractals: Finding Hidden Order*. Wittenberg University.
2. *dfield and pplane: the java versions*. Department of Mathematics at Rice University.
3. *Dynamical Systems*. Unit for Engineering Mathematics at the Institute for Basic Sciences in Civil Engineering, University of Innsbruck.
4. *Easy Java Simulations*. Universidad de Murcia.
5. *Física con ordenador*. Universidad del País Vasco.
6. *Geogebra applet for families of discrete dynamical systems*. Division by Zero. A blog about math, puzzles, teaching, and academic technology.
7. *Java applets for Chaos and Fractals*. Faculty of Mathematics, University of Waterloo.
8. *Programas interactivos (applets)*. Instituto de Educación Secundaria Juana de Pimentel.
9. *Serendip, Chaotic Dynamical Systems and Complex Systems*. Bryn Mawr College.
10. *The Dynamical Systems and Technology Project*. Boston University.

Capítulo 9

Sistemas complejos (Opción A)

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 6.4) 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 final¹ 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.

9.1. 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) Autosemejanza y estructura geométrica

¹Por 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.

9.2. 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

9.3. Bibliografía de la línea

9.3.1. 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. Boccaro, 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 Dynacmics 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)

9.3.2. Fractales

1. Barnsley Michael F. (1988): *Fractals Everywhere*. Boston, Academic Press. (I)
2. Falconer, Keneth 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 Jurgén (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)

9.3.3. 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.

9.3.4. 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, Massachussets. 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 bioreactor. 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. Weisenfeld (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 *Lepthorax 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).

Capítulo 10

Complejidad (Opción B)

10.1. Temario de Complejidad I

Los propósitos generales de esta asignatura son que el estudiante

- Identifique conceptualmente las características básicas asociadas con un sistema complejo.
- Se inicie en la simulación computacional de sistemas dinámicos no lineales discretos simples en los cuales es posible identificar comportamientos complejos.

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) Autosemejanza y estructura geométrica.
 - 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.
- e) Fractales aleatorios.
- f) Crecimiento fractal y percolación.
3. Criticalidad y transiciones de fase.
- a) Teoría de las transiciones de fase
- 1) Transiciones de fase de primer y segundo orden.
 - 2) Rompimiento espontáneo de simetría.
- b) Distribuciones de libre escalamiento
- 1) Ley de Pareto.
 - 2) Ley de Zipf.
 - 3) Distribución log - Normal
 - 4) Ruido $1/f$.
- c) Patrones emergentes en sistemas complejos
- 1) Patrones espaciales.
 - 2) Patrones temporales, sincronización.
 - 3) Ciclos adaptativos.
4. El mundo de los programas simples: autómatas celulares
- a) Una dimensión
- 1) Autómatas elementales. Definición y propiedades generales.
 - 2) Clasificación de Wolfram.
 - 3) Computación universal.

- b) Dos dimensiones: El “juego de la vida” de Conway.
 - c) Aplicaciones.
 - 1) Modelo de segregación de Schelling.
 - 2) Dilema del prisionero.
 - 3) Depredador-presa.
 - 4) La pila de arena.
 - d) Modelo del fuego en el bosque.
5. Auto-organización hacia la zona crítica
- a) Terremotos.
 - b) Pila de arena.

10.2. Temario de Complejidad II

Los propósitos generales de esta asignatura son que el estudiante

- Reconozca las herramientas básicas (agentes, redes, series de tiempo no lineales) para el estudio de un sistema complejo.
- Lleve a cabo simulaciones basadas en agentes de modelos sistemas complejos.
- Identifique las propiedades topológicas básicas de una red compleja.
- Use software para analizar redes complejas.
- Use software para el análisis de series de tiempo.

1. Modelación Basada en Agentes (MBA)

- a) Conceptos básicos
- b) Introducción a *Netlogo*
- c) Aplicaciones de la MBA a problemas sociales
 - 1) Modelos de la regla de la mayoría.
 - 2) Modelos de propagación de información.

- 3) Modelos de cooperación.
- 4) Modelos con estrategias.
- 5) Modelos de movimiento de agentes (flujo vehicular).

2. Redes complejas

- a) Teoría general
 - 1) Conceptos básicos de la teoría de grafos.
 - 2) Redes exponenciales.
 - 3) Redes libres de escala.
 - 4) Propiedad y modelos de mundo pequeño.
- b) Crecimiento de redes
 - 1) Enlace igualitario.
 - 2) Enlace preferencial.
 - 3) Transición de fase en redes con distribución exponencial.
- c) Redes Neuronales(*)
 - 1) Introducción.
 - 2) Estructura y características.

3. 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.

10.3. Temario del Taller Propedéutico de Modelación

Los propósitos generales de esta asignatura son que el estudiante

10.3. TEMARIO DEL TALLER PROPEDEÚTICO DE MODELACIÓN¹²¹

- Discuta temas selectos de áreas afines a su interés académico o profesional a través de artículos donde la complejidad ha dado enfoques alternativos.
- Realice un trabajo de campo donde recolecte datos de un sistema social o biológico de su interés y los analice con las técnicas propias de su disciplina.
- Discuta su trabajo bajo el enfoque de otras disciplinas afines.
- Contraste el trabajo del punto anterior con el enfoque de Sistemas Complejos.
- Desarrolle un modelo del sistema social/biológico con las herramientas de sistemas complejos, dejando su implementación para el Taller de Sistemas Complejos.

1. Modelación matemática

2. Proceso del modelado

- a) Lluvia de ideas
- b) Enfoque sus ideas en la teoría
- c) Construcción de hipótesis
- d) Diagramas de flujo
- e) Codificación y documentación
- f) Validación del modelo
- g) Comprobación y publicación
- h) Ejemplos

3. Construcción de modelos del interés del estudiante, en esta parte, el temario se adaptará al interés del estudiante, por lo que no es posible plantear uno general.

10.4. Bibliografía de la línea

1. Anderson Phillip W. (1994): “Physics: The Opening to Complexity” en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. **92**, pp. 6653-6654, July 1995. Colloquium Paper.
2. Boccaro, Nino (2004): *Modelling Complex Systems*. Nueva York, Springer-Verlag.
3. Coveney, P. y Roger Highfield, (1992): *The Arrow of Time: A Voyage Through Science to Solve Time’s Greatest Mystery*. Nueva York, Fawcett Books.
4. Coveney, P. y Roger Highfield (1996). *Frontiers of Complexity : The Search for Order in a Chaotic World*. Nueva York, Fawcett Books.
5. Goodwin, Brian (1994): *How the Leopard Changed its Spots. The evolution of complexity*, Nueva York, Touchstone.
6. Gros, Claudius (2008): *Complex and Adaptative Dynamical Systems: a Primer*. Berlín, Springer-Verlag. Serie: Springer Complexity.
7. Holger, Kantz and Thomas Schreiber (2004): *Nonlinear Time Series Analysis*, Cambridge University Press.
8. Kauffman, Stuart A. (1994): *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford, Oxford University Press.
9. Liebovitch, Larry S. (1998): *Fractals and Chaos: Simplified for life Sciences*. Oxford, Oxford University Press.
10. Lewin, Roger (2000): *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. Chicago, University of Chicago Press.
11. Nicolis, Grégoire e Ilya Prigogine (1989): *Exploring Complexity: An Introduction*. Nueva York, W. H. Freeman & Co.
12. Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers (1989): *Order Out of Chaos: Man’s New Dialogue with Nature*. Nueva York, Bantam Doubleday.

13. Stewart, Ian (1998): *Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World*. Nueva York, John Wiley.
14. Waldrop, M. Mitchell (1992): *Complexity: the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. Nueva York, Touchstone Books.

Capítulo 11

Seminarios finales

11.1. Seminario de Investigación

Los propósitos generales de este seminario son que el estudiante

- Identifique, para desarrollar su tesis de grado, un tema dentro de las líneas de investigación descritas en el capítulo 5 de este documento (véase las página 55, *supra*).
- Inicie el desarrollo de la investigación sobre el tema del inciso anterior.
- Identifique a quién podría ser, entre los académicos elegibles, su director de tesis.

11.2. Seminario de Tesis

Los propósitos generales de este seminario son que el estudiante

- Concluya la investigación del tema de su tesis de grado.
- Escriba la tesis y la someta a consideración de los lectores que conformen el jurado que habrá de examinarlo para otorgarle el título de Maestro en Ciencias de la Complejidad en la opción correspondiente al plan de estudios que haya cubierto.

Parte IV
Apéndices

Apéndice A

Asignaturas opcionales sin valor curricular

A.1. 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 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 9.2).

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

A.2. Inglés

Los profesores de la Academia de Idiomas del Plantel del Valle ofrecerán los cursos de *Lectura de Textos en Inglés I, II y III* y de *Inglés I, II y III* para que los estudiantes de la MCC:

- Desarrollen las estrategias de lectura, vocabulario y aprendizaje, así como las habilidades académicas y los aspectos lingüísticos y discursivos que les permitan leer, de manera independiente, textos académicos auténticos en inglés.
- Puedan comunicarse oralmente y por escrito en inglés, con hablantes nativos y no nativos de esa lengua, en interacciones cortas en las que se utilicen las funciones comunicativas y los exponentes lingüísticos que componen los contenidos de estos cursos.
- Puedan establecer relaciones entre su propia identidad, su cultura y la de otras comunidades, tomando en cuenta la adopción de roles sociales apropiados al contexto.

132 APÉNDICE A. ASIGNATURAS OPCIONALES SIN VALOR CURRICULAR

Apéndice B

De los cursos de apoyo

Para contribuir a que, quienes lo requieran, puedan cubrir satisfactoriamente los requisitos de ingreso (véase la sección 3.4) 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. El propósito de estos cursos será propiciar que los interesados recuperen o complementen los conocimientos matemáticos básicos que el Comité de Admisión les haya recomendado.

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.

B.1. Álgebra superior y álgebra lineal

B.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.

B.1.2. Referencias

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

B.2. Ecuaciones diferenciales

B.2.1. Contenido

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.

B.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.

B.3. Nociones de análisis matemático

B.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.

B.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, CEI-ICH-UNAM-Siglo XXI. Colección Aprender a Aprender, pp: 83-92.
- [12] Poincaré, Henri Jules (2011): *Science and Hypothesis*. Nueva York. Dover, 288 pp.
- [13] Prigogine, Ilya y P. Glansdorff (1971): *Structure, stabilité et fluctuations*. París. Masson et Cie. Éditeurs.
- [14] 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.