ARTICULOS

La matemática en la síntesis del panorama científico

> "Esta interacción no es, desde mi punto de vista, simplemente un accidente ocasional e interesante, sino algo de la esencia de la matemática. Hallar analogías entre diferentes fenómenos y desarrollar técnicas para explotar estas analogías es el acercamiento básico de la matemática al mundo físico"
>
> Michael Atiyah[1]

Introducción

La ciencia ha hecho tales progresos que ya no puede sustraerse a la síntesis dialéctica. A medida que la ciencia ha ido presentando una descripción más y más coherente del mundo material se hacen más claras las tendencias hacia su unificación. Pero tales tendencias se expresan a través de un proceso complejo, el cual incluye tanto la síntesis teórica, la interconexión entre diferentes regiones disciplinarias, como la universalización de los métodos y el entretejido de disímiles estilos de pensamiento. Todos estos aspectos concebidos dialécticamente se convierten en expresión dinámica de la profunda y necesaria interacción entre el desarrollo socio-económico y el progreso científico-técnico.

La integración de las ciencias se realiza bajo la influencia de múltiples factores. Nuestro objetivo es destacar la fuerza unificadora de uno de estos factores: *el proceso de matematización del conocimiento científico*.

Tanto como las matemáticas de las magnitudes variables significaron en los siglos XVII y XVIII la expresión adecuada de la concepción mecanicista del mundo en esa época, así, la matemática actual refleja la aceleración del proceso de dialectización de la ciencia en la adecuación a las condiciones de la Revolución Científico Técnica.

El desarrollo de la lógica interna de las diferentes disciplinas que constituyen la matemática, así como la ampliación de sus nexos con las diferentes formas de movimiento del mundo objetivo, hacen que ésta refleje aún mejor la dialéctica del conocimiento y cumpla efectivamente una función metodológica. De esta forma, la ma-

Carlos Sánchez
Universidad de La Habana, Cuba

[1] M. Atiyah, discurso presidencial dirigido a la London Math. Society el 19 de noviembre de 1976. Aparece en el *Bull. London Math. Soc.* No. 10 (1978), pág. 76.

temática, sin romper la lógica interna de su propio desarrollo se une orgánicamente con otras ciencias con el fin, no sólo de comprender mejor los fenómenos y procesos, sino también, para actuar eficazmente en la transformación del mundo.

Se pueden destacar tres particularidades metodológicas, rectoras en la evolución actual de la matemática, que han ampliado su capacidad integradora:

1) *Sostenido y elevado papel de las estructuras teórico-conjuntistas* con un alto nivel de generalidad, lo cual garantiza la preservación de la unidad teórica en los fundamentos de la matemática, a pesar de la inmensa ramificación en diferentes direcciones.

2) *Utilización del experimento matemático computacional* no sólo en los aspectos de cálculo sino, sobre todo, como eslabón intermedio entre los sistemas más complejos y las teorías matemáticas, a través de la simulación y el análisis cualitativo de fenómenos extramatemáticos, los cuales son imposibles de investigar en los clásicos laboratorios.

3) *Comprensión más amplia del concepto "Matemática Aplicada"* con la aparición de nuevos métodos y algoritmos más flexibles y adaptables a las condiciones menos favorables a la formulación cuantitativa y formal, sobre todo, en el tratamiento de los sistemas abiertos y complejos de las ciencias sociales, donde se opera con conceptos bastante imprecisos e indeterminados.

El tránsito de la forma práctica de sistematización del conocimiento matemático a la forma teórica y el tránsito recíproco de la forma teórica a la práctica, representa en sí un mecanismo dialéctico cuyo efecto final lo constituye la aparición de una **matemática unificada**, que abarca tanto las investigaciones teóricas como prácticas. La unidad orgánica de la matemática, de sus ramas fundamentales más teóricas y de aquellas de carácter más concreto y práctico, en un sistema donde se crean nuevas y diferentes posibilidades heurísticas y comunicativas, es una de las razones principales de su capacidad integradora. *Lo que la matemática va logrando en sí misma, la capacita para promoverlo en la síntesis del panorama científico*.

Con los ejemplos concretos con que ilustramos este proceso pretendemos aproximarnos algo más a la comprensión dialéctica de la síntesis del panorama científico futuro y favorecer políticas más amplias y realistas que nos permitan entrar pisando firme en el milenio inminente.

El lenguaje matemático en el dominio de lo difuso y del caos

"El destino supremo de la matemática consiste precisamente en encontrar el orden oculto en el caos que nos rodea".
Norbert Wiener[2]

Es bastante común encontrar reconocimientos al nivel de formalización del lenguaje matemático. Su construcción formalizada le brinda al lenguaje matemático no sólo la posibilidad de la descripción de relaciones cuantitativas del mundo real sino que le permite además el análisis lógico de las teorías científicas, de su estructura y de los modos de formación de los conceptos y demostraciones. El método axiomático introducido en la geometría griega alrededor del siglo IV a.n.e., gracias a la influencia de Aristóteles sobre todo, se extendió paulatinamente a toda la matemática y en la primera mitad de este siglo comenzó su penetración en otras regiones como la genética, la lingüística y la mecánica cuántica, estimuladas por los logros en la matemática y más tarde, por la automatización de los razonamientos deductivos en la misma concepción teórica de las máquinas computadoras electrónicas.

Antes de la aparición de las computadoras realmente era poco lo que se esperaba, desde el punto de vista práctico, de

[2] N. Wiener, *Yo, matemático*, ed. CONACYT, México (1981), pág. 27.

la utilización de los lenguajes formalizados y de las demostraciones basadas en ellos. El matemático americano Hao Wang en su artículo "Toward mechanical mathematics" señala que las posibilidades de las computadoras en la demostración matemática son inestimables. Con ayuda de un programa Hao Wang logró en menos de tres minutos comprobar la demostración de 200 teoremas del famoso tratado "Principia Mathematica" de B. Russel y A.N. Withehead.[3]

Al ampliarse la comprensión del lenguaje formalizado y del concepto de demostración matemática y con el apoyo de las computadoras se han logrado resolver viejos problemas teóricos (p.e. el problema de los cuatro colores, resuelto por Appel y Haken en 1976[4]) que por otras técnicas hubiera sido imposible resolver. Además, de esta forma se ha logrado una interacción entre la matemática y la tecnología de la información.

Los logros en la formalización del lenguaje lógico-matemático propiciaron el surgimiento de los lenguajes de las computadoras y de los autómatas. A su vez, el desarrollo tecnológico de la industria electrónica y la informática en general, motivó un replanteamiento de las concepciones clásicas sobre la demostración matemática.

El carácter computarizado de la revolución científico-técnica destaca entre las ciencias fundamentales a la matemática. Aquellos científicos ocupados en la investigación de procesos de carácter psíquico o social, acostumbrados a creer más en el experimento y la intuición que en el análisis matemático, han ido reconociendo el papel de los algoritmos matemáticos.

Se ha generalizado el criterio de que la intuición, el experimento y el lenguaje matemático, no sólo pueden coexistir en el dominio de los sistemas complejos, sino, sobre todo, interactuar, perfeccionándose mutuamente.

Un ejemplo de esto último lo vemos en el surgimiento de una de las formas más difundidas actualmente en la expresión de los fenómenos psíquicos y sociales. Nos referimos al lenguaje de los conjuntos difusos (fuzzy sets). El primer artículo sobre tal lenguaje matemático aparece en 1965[5] y muy rápidamente se estableció como una de las formas más efectivas de modelar los sistemas humanos.

Así, la teoría de lo difuso o impreciso es utilizada en diferentes disciplinas psicológicas, en particular para la modelación de las reacciones de los interrogados en encuestas sociológicas o de expertos, y en la psicofísica para medir la reacción del hombre ante estímulos físicos tales como el ruido, el calor, el sexo, etc.

Lo interesante para nosotros es que este aparato de lo difuso aparecido para el análisis de los sistemas complejos vinculados a las ciencias humanísticas ha encontrado amplia repercusión también en las ciencias más exactas en conjugación con los métodos clásicos. Así, un grupo de químicos dirigidos por el académico V.V. Kafarov, para el estudio de procesos químico-tecnológicos en la producción del cristal en láminas aplicaron el método de Fourier y un algoritmo basado en la utilización de los conjuntos difusos. Agreguemos que este modelo necesitó cinco veces menos de tiempo de máquina para el mismo orden de precisión en la respuesta que se obtiene por los métodos ordinarios en computadora.[6]

Aquí vemos como, a través de los algoritmos difusos, el conocimiento matemático sirve para la unión extrateórica y cómo se establecen nexos entre los viejos y nuevos métodos y entre ramas consideradas ajenas como lo es la química y la psicología.

Tomemos otro ejemplo de una rama bastante olvidada por la matemática: la

[3] H. Wang, Toward mechanical mathematics en el libro *Logic, computers and sets*, N. York (1970), pág. 226.

[4] K. Appel, W. Haken *Every planar map is four colorable* Bull. Amer. Math. Soc. T. 82 No. 5 (1976). Este problema se venía atacando desde 1852 y en 1969 con ayuda de la matemática discreta se redujo al estudio de unos 1200 grafos. Se ha comprobado que sin la ayuda de las computadoras es humanamente imposible resolver este problema.

[5] L.A. Zadeh. *Fuzzy Sets* Inf. Control Vol. 8 (1965), pp. 338-353.

[6] V.V. Kafarov, I.N. Dorojov, E.P. Markov. *Principio de descripción de los procesos químico-tecnológicos con ayuda de conjunto difusos*. Dok. Akad. Nauk URSS T.243, No. 1 (1978), pp. 159-162 (en ruso).

medicina. ¿A qué se debe este olvido? Ante todo por la imprecisión de los datos, ¿qué paciente es capaz de expresar exactamente los síntomas de la enfermedad que padece o cree padecer? El médico, consciente de que los parámetros son imprecisos, suele acumular gran cantidad de datos, muchos de los cuales no dan ninguna información sino más bien desvían al investigador de la esencia del problema. Para hacer los análisis estadísticos hace falta tomar los datos menos correlacionados entre sí, lo cual aumenta la validez del diagnóstico con este número de síntomas. Además las limitaciones de la memoria del médico para operar con todos los datos acumulados no permite dar respuesta confiable en la mayoría de los casos. Todo lo anterior promovió a la aplicación de la modelación matemática y la utilización de los métodos de simulación con los medios de cómputo. Quizás el más sonado de los logros en este campo es el método de la tomografía computacional del cerebro, elaborado por el ingeniero inglés G.N. Hounsfield y el matemático norteamericano A.M. Cormack por el que recibieron el premio Nobel de Medicina.

Con este ejemplo, además de señalar las aplicaciones del lenguaje matemático en la medicina queremos subrayar también que junto a las nuevas técnicas, los viejos enfoques (desarrollos en series y métodos de transformadas) adquieren un valor novedoso y se constituyen en direcciones que favorecen la comunicación entre varias regiones del conocimiento. La teoría matemática de la reconstrucción de imágenes ampliamente utilizada en el procesamiento de información biomédica, engloba técnicas y simbología mucho antes aplicada por los ingenieros eléctricos en los problemas clásicos conocidos como *problemas de inversión del análisis armónico*, con métodos matemáticos totalmente nuevos. "Los algoritmos para la reconstrucción de imágenes dadas por proyecciones han extendido nuestra habilidad para visualizar las estructuras internas de objetos en un amplio espectro de aplicaciones físicas extendiéndose desde las dimensiones moleculares (microscopía electrónica) hasta las dimensiones cósmicas (radiogastronomía). En tomografía computarizada, por ejemplo, se reconstruyen imágenes que nos permiten visualizar la distribución de rayos X bajo el coeficiente de atenuación a través de las secciones del cuerpo humano".[7]

Si el lenguaje matemático se consideraba como el paradigma para la expresión de la simetría y el orden, ahora nos lo encontramos también en la esfera de lo impreciso, de lo difuso y del caos. Particularmente las propiedades físicas siempre han estado inseparablemente inlazadas con la geometría. Por ejemplo, las propiedades físicas de los cristales se determinan conforme a la geometría de las redes cristalinas aplicando el lenguaje de la teoría de grupos.

Actualmente se estudian una serie de fenómenos llamados *fenómenos críticos*. Estos fenómenos se caracterizan por la existencia de uno o más puntos críticos o *singularidades* cerca de los cuales el sistema cambia bruscamente sus cualidades. La física de todos los fenómenos críticos es muy peculiar y tiene rasgos comunes. El más importante de ellos consiste en que cerca del punto crítico el sistema parece como si se dividiera en bloques de propiedades diferentes, además, las dimensiones de algunos de estos bloques crecen ilimitadamente al acercarse al punto crítico. En ciertos fenómenos toda la configuración varía caóticamente en función del tiempo, en otros fenómenos esa configuración permanece estática, pero cambia al pasar de una muestra a otra. Los bloques se hallan dispuestos desordenadamente, por lo cual, al mirar la fotografía instantánea del sistema es difícil ver algunas regularidades. "Sin embargo, esta geometría que es llamada *geometría del desorden*, posee propiedades absolutamente determinadas. Lo más interesante es que gracias a los grandes tamaños de los bloques, dicha geometría no depende, en realidad, de la estructura atómica de la sustancia y por esta razón, posee propiedades universales idénticas para muchos sistemas completa-

[7] R.M. Lewitt. *Reconstruction Algorithms: Transform Methods. Proceedings of the IREE*, Vol. 71, No. 3 marzo (1983), pág. 390.

mente diferentes".[8] La teoría del caos o de los fenómenos críticos no se ha desarrollado todavía como una ciencia exacta desde el punto de vista matemático, no obstante la bien conocida *teoría de las singularidades* como grandiosa generalización de la clásica teoría de los máximos y mínimos ha recibido recientemente en las investigaciones del soviético V.I. Arnold una consistencia teórica que la hace un instrumento altamente confiable.

El lenguaje de la teoría de las singularidades, dado que es tan general y abarca gran cantidad de procesos y fenómenos, ha sido aplicado en óptica geométrica y física, embriología, lingüística, psicología experimental, economía, hidrodinámica, geología, teoría de las partículas elementales, en modelación de la actividad del cerebro, en la precisión de la influencia del alcohol sobre los choferes, etc. Esta teoría en los medios más *comerciales* se conoce como *teoría matemática de las catástrofes* y alcanzó en la década del 70 una resonancia similar a la que la teoría de la relatividad alcanzara a principio de siglo. Uno de los principales promotores de esta mística fue el francés René Thom: "en el plano filosófico, metafísico, la teoría de las catástrofes no puede dar respuesta a los grandes problemas que conmueven al hombre. Pero ella permite una visión dialéctica, heraclítica del universo, una visión del mundo como teatro de una lucha continua entre *logos*, entre arquetipos".[9] Aquí cabe decir como Arnold: "los bellos resultados de la teoría de las singularidades, por suerte, no dependen de la tenebrosa mística de la teoría de las catástrofes".[10]

No pretendemos agotar los argumentos que nos permiten afirmar que el lenguaje matemático ha adquirido, en la época de la revolución científico-técnica una importancia mayor, primero, porque se ha adaptado a las formas más complejas del conocimiento y segundo, porque no ha olvidado lo logrado en el plano de la formalización, y en una síntesis dialéctica, impulsada por las bondades de la tercera generación de computadoras, entrelaza en la interacción, regiones inexploradas con regiones de clásica matematización, enriqueciendo ambas vertientes y a su vez, haciendo más abundante el caudal de sus posibilidades comunicativas e integradoras.

Los modelos matemáticos en la interconexión de los conocimientos científicos

> "...el desarrollo matemático usa la experiencia y la intuición para descubrir estructuras formales apropiadas, para hacer análisis deductivos de estas estructuras y establecer interconexiones formales entre éstas".
>
> **Saunders MacLane**[11]

Paralelamente a la formación de conceptos y teorías generales al más alto nivel de abstracción, como parte de un movimiento de reorganización interna, se produce también un cambio radical en los métodos de la matemática y en sus interacciones con las demás ciencias. Si hasta el siglo XIX los dominios de aplicación se restringían a la mecánica, la física, la astronomía y algunas ramas de la técnica, a comienzos de este siglo van apareciendo *eslabones mediadores* entre tales teorías tan abstractas y los problemas más concretos que el desarrollo socioeconómico exigía resolver. Así, por ejemplo, aparecen: *la teoría de colas o teoría matemática de los servicios masivos, la teoría matemática de la investigación operacional, la teoría matemática de la fiabi-*

[8] A. Efros. *Física y geometría del desorden*, ed. Mir. Moscú (1987), pág. 8. Este libro se dedica fundamentalmente a la teoría de la percolación, cuyas ideas fueron enunciadas por primera vez en 1957 en la obra de los científicos ingleses S.R. Broadbent y J.M. Hammersley, y su génesis es sumamente ilustrativa de las ideas que desarrollamos en nuestro trabajo. En el transcurso de los 30 años que han pasado desde el primer trabajo, se aclaró que la teoría matemática de la percolación es necesaria para comprender un extenso círculo de fenómenos relacionados principalmente con la física y la química.

[9] R. Thom. *Catastrophes Theory: its present state and future perspectives*. Dynamical Systems, Warwick 1974. Lectures Notes in Math. No. 468. Berlín. (1975), pág. 372.

[10] V.I. Arnold. *Teoría de las catástrofes*. Colección Znanie No. 9 (1981), pág. 59. (en ruso).

[11] S. MacLane. *Mathematical Models: a sketch for the philosophy of Mathematics. American Math.* Monthly No. 88 (1981), pág. 471.

lidad y otras que pronto van penetrando nuevas regiones del saber, inexploradas matemáticamente.

Según el eminente matemático soviético G.E. Shilov, en toda la historia de la civilización el mundo real ha dado tres potentes impulsos al desarrollo de la matemática: la primera vez en la edad antigua cuando las necesidades de contar y medir impulsaron el surgimiento de la aritmética y la geometría; el segundo impulso en los siglos XVI-XVII a través de los problemas de la mecánica y la física que llevaron a la formación del cálculo infinitesimal; y el tercer impulso "la matemática lo obtiene en nuestros días; ésta es la cibernética, los grandes sistemas de diferentes formas, los problemas de la información y el control. Puede no dudarse que la estructuración de nuevas ramas de la matemática, que se formen bajo el influjo de este impulso, requerirá de los matemáticos en muchos años y décadas, un trabajo tenso".[12]

No se equivocaba G.E. Shilov, en las últimas dos décadas bajo el influjo del desarrollo de las computadoras, la matemática se ha enriquecido notablemente y no sólo han aparecido nuevos dominios de aplicación sino que también los clásicos campos de intercambio metodológico, como la mecánica y la física, que a su vez recibían tal influjo, han requerido un nuevo enfoque de la modelación matemática.

Un ejemplo fehaciente lo constituye la introducción del llamado *experimento matemático o computacional*, que a mediados de la década del 60 se estableció como nuevo estilo de investigación. El experimento computacional en algunas ramas es el único medio de obtención de la información cuantitativa sobre los fenómenos, por ejemplo, en la astrofísica, en la investigación de los estadios tempranos de desarrollo del universo o para el dominio de la energía nuclear.

Consideremos otro ejemplo. Antes era muy extraño encontrar el tratamiento matemático de los problemas no lineales. Todo aquel que en la física o en la mecánica encontraba un problema con modelo matemático no lineal se esforzaba en *linealizar* el modelo, a través de diferentes métodos. Ahora los investigadores saben que tales problemas se pueden resolver utilizando las computadoras y esto ha hecho que aumente la atención hacia la teoría de los modelos no lineales. Los resultados analíticos obtenidos han permitido descubrir una serie de nuevos efectos en procesos ondulatorios (como la interacción de solitones). Parte de estos fenómenos fueron descubiertos primero en experimentos computacionales y esto ayudó a los investigadores a la solución del problema por métodos puramente analíticos.

Una prueba concreta de la fuerza de esta nueva metodología fue el descubrimiento del nuevo efecto físico denominado *T-capa* (T de temperatura). Bajo la dirección de los académicos soviéticos A.N. Tijonov y A.A. Samarsky, un grupo de investigadores matemáticos, físicos, cibernéticos y técnicos, establecieron el modelo matemático del movimiento del plasma en un campo magnético. A través del experimento computacional se simularon las múltiples variantes del proceso y se pudo llegar hasta el descubrimiento. Tuvieron que pasar cinco años más para que los físicos ratificaran este fenómeno a través del experimento tradicional en el laboratorio. Como se ha dicho con razón, la máquina computadora fue coautora del descubrimiento.[13]

Otra característica importante de la matemática en esta época lo constituye la utilización de métodos de razonamientos antes exclusivos de las ciencias llamadas no exactas. Tal rasgo ha sido llamado por unos *pérdida de la certidumbre*, *cuasiempirismo* y por otros *humanitarización*.[14]

[12] G. Katsiveli (seudónimo de G.E. Shilov). *Matemática y realidad* Istoriko-matematicheskije isliedovanija T. 20 (1975), pág. 24. G.E. Shilov, junto al académico I.M. Guelfand, desarrolló la utilización de los métodos algebraicos y complejos en el análisis funcional, así como las aplicaciones a las ecuaciones diferenciales.

[13] Sobre este descubrimiento se ha escrito mucho en los últimos años, para los que leen ruso remito a N.V. Zmitrienko y A.P. Mijailov *La inercia del calor*. Colección Znanie, No. 12 (1982).

[14] M. Kline. *The Loss of Certainty*. Oxford Univ. Press, N. York (1980). I. Lakatos. *Matemática, ciencias y epistemología*, ed. Alianza. Madrid (1981). E. Ventzel Particularidades de la matemática aplicada en el mundo actual, en la recopilación *Matemáticos sobre la matemática*. Colección Znanie, No. 8 (1982).

Esta audacia en la diversificación, ampliación y profundización de las aplicaciones matemáticas se debe ante todo a las condiciones de trabajo científico en la época de la revolución científico-técnica, pero una vez más debemos acotar, que tales condiciones se venían gestando en la matemática y en las ciencias sociales desde mucho antes. Aunque el tratamiento matemático de los llamados *sistemas complejos* se hace característico precisamente en esta época, desde principio de siglo los métodos matemáticos venían introduciéndose paulatinamente en la economía, la biología, la psicología y la sociología. Es cierto que los métodos más corrientes eran de un carácter estadístico elemental, pero la acumulación de métodos y experiencias fue forjando la base para el salto cualitativo de la década del 60 al extenderse el uso de las computadoras de la tercera generación.

Para que los métodos matemáticos pudieran penetrar las regiones menos formales del conocimiento, no sólo las ciencias humanísticas se debían acercar a las ciencias exactas sino que también la matemática debía ampliar y flexibilizar sus métodos. "La matemática aplicada, irrumpiendo en dominios nuevos para ella, debe en correspondencia reconstruirse, elaborar una nueva y más flexible táctica, formar una nueva ideología".[15]

En la elaboración de esta nueva táctica, la matemática no va a inventar maravillosos y sorprendentes métodos, sino que va a utilizar más eficiente y racionalmente los métodos y formas que venía desarrollando a través de su interacción con los problemas clásicos de las ciencias tradicionalmente llamadas exactas, pero, por supuesto, adecuándolos a las características más complejas de los sistemas humanísticos y a la existencia de los medios de cómputo que permite la simulación y el diálogo directo.

Observamos tres rasgos principales:

Crecimiento del papel de las concepciones probabilísticas.

[15] E. Ventzel, ob. cit. pág. 44.

En el fundamento de las relaciones teóricas entre los métodos estadísticos y los métodos estocásticos, por las mismas brechas abiertas en los sistemas complejos, por los métodos de muestreo, del diseño de experimento y la inferencia estadística van penetrando los métodos de los procesos estocásticos de la teoría de colas y la teoría de la fiabilidad entre otros, a su vez emparentados teórica y prácticamente con concepciones determinísticas y con la técnica más avanzada.

Extensión de las ideas de la optimización matemática

Comprobada su potencialidad en la economía matemática y gracias a la posibilidad de la simulación en las computadoras de situaciones modeladas por grandes sistemas de ecuaciones e inecuaciones, es decir, de la posibilidad del juego computacional con una diversidad de condicionantes, se trasladaron las ideas exitosas de la programación matemática a nuevas regiones más complejas donde las soluciones no son únicas y los métodos clásicos no son aplicables directamente para determinar las variantes óptimas.

Ampliación de las aplicaciones de las ideas y métodos de la matemática discreta

Aunque la matemática discreta es tan antigua como la teoría de números y el álgebra y tiene parientes más cercanos en el análisis combinatorio y la teoría de grupos, es común referirse a ella como una rama de la nueva cibernética matemática. Realmente, con la utilización de las computadoras y la necesidad de intercambios racionales con éstas, es que las ideas y métodos de la matemática discreta pasan de ser considerados un juego intelectual a un instrumento eficaz y potente del conocimiento científico.

La propia matematización de los sistemas más complejos exige la maduración y renovación de los métodos matemáticos, y demanda aún más, la consideración más amplia y general de los métodos, de manera que se puedan adaptar a cualquier tipo de sistema: técnico, biológico, social o administrativo. Algo similar ocurrió en el desarrollo de la cibernética, a la cual, ya en la década del 70, se le relacionaban más de 20 disciplinas, tan disímiles como la *cibernética biomecánica, la lingüística matemática, la cibernética económica, la teoría de las redes neurónicas* y por supuesto la *cibernética matemática*. Esta última no es más que el producto de la utilización de los métodos matemáticos para la solución de los problemas generales de la información y el control.

Muy recientemente ha aparecido una nueva línea de investigación que responde, en cierta forma, a las exigencias arriba apuntadas. Aunque todavía se polemiza acerca de la condición de ciencia de lo que se ha dado en llamar *sinergética* o *teoría de la autoorganización*, ya se observan logros importantes en los que se distinguen leyes generales.

La sinergética pretende dar una descripción interdisciplinaria de varios fenómenos, tanto estáticos como dinámicos, que ocurren en diversos campos como la física, la química, la biología, la medicina, la sociología y la economía.[16] Uno de los problemas básicos de la sinergética es determinar cómo un sistema complejo puede ser reducido a un sistema simple que mantenga solo aquellos parámetros los cuales son esenciales para la modelación matemática del comportamiento del sistema original. A diferencia de la cibernética, el acento se pone no en los procesos de control e intercambio de la información, sino en los principios de formación de la organización, su surgimiento, su desarrollo y autocomplejización.

Un reconocimiento especial han obtenido los trabajos sobre los efectos de la autoorganización de las reacciones químicas realizados por los científicos de la escuela de Bruselas, bajo la dirección de I. Prigogine. Para la explicación de algunos de los procesos que no se adaptaban a los fundamentos establecidos en los años 30 sobre la termodinámica lineal, propusieron modelos no lineales. Los trabajos del grupo de Prigogine sobre procesos irreversibles en sistemas abiertos no estables, recibieron el premio Nobel de Química en 1977. El modelo *bruseliano*, como ahora se le conoce, es uno de los tantos modelos existentes en la sinergética. El mismo modelo bruseliano refleja rasgos generales de muchos sistemas donde aparecen estructuras y fenómenos de autoorganización. Por ejemplo, en el tratamiento del problema de la morfogénesis, una de las líneas más interesantes de la biología contemporánea, relacionado con el intercambio de la información genética de la generación de células a otra, aparece un sistema de ecuaciones difernciales muy similar al del modelo bruseliano, por eso muchos métodos desarrollados en el estudio del modelo bruseliano actúan efectivamente también aquí, con el apoyo que brindan las computadoras.

En resumen, los métodos matemáticos que venían perfeccionándose en su interacción con la astronomía, la mecánica, la física y otras ciencias naturales, en la etapa actual, con una concepción más amplia que desborda los límites de lo cuantitativo y con la colaboración de la tecnología de la información (en especial la simulación con computadoras), van penetrando en todas las esferas del conocimiento. Se establecen puentes de intercambio mutuo y constante entre los diferentes complejos de ciencias sociales, naturales y técnicas, estimulando a su vez el mismo desarrollo de la matemática.

El problema no reside en desconocer esta potencialidad de la matemática, sino en que después de enterados sigamos indiferentes.

[16] Sobre la sinergética se ha escrito bastante en la última década. La primera publicación amplia sobre esta nueva disciplina es el libro de I. Haken *Synergetics* Springer Verlag. Berlín (1978).