Modelos de las relaciones sociedad-medio ambiente usando teoría de sistemas

Juan José Zoreda Lozano*

Se examinan las nociones de sistema concreto y sistema dinámico, según se dan en la teorías matemáticas aplicadas de sistemas y procesos de mando, y se proyectan sus aplicaciones al análisis crítico de las interacciones entre actividades socioeconómicas y medio biogeofísico. Para este efecto, se parte de una aproximación formal al estudio de tales interacciones, involucrándose en ello la caracterización de los sistemas concretos y sistemas dinámicos. En ese contexto, se bosqueja un esquema general para su inserción en el análisis de la relaciones sociedad-medio biogeofísico.

El propósito de este trabajo es examinar las nociones de *sistema concreto* y *sistema dinámico*, las cuales surgen en la teorías matemáticas aplicadas de sistemas y procesos de mando, y sus aplicaciones al análisis crítico de las interacciones entre actividades socioeconómicas y medio biogeofísico. Se propone una aproximación teorética científica al estudio de tales interacciones, y se analizan sobre todo sus implicaciones lógico-formales y de contenido cognoscitivo. En ese contexto, el papel lógico de metáforas y analogías

* Departamento de Tecnología y Producción, CYAD/UAM-X

se menciona brevemente. Por lo tanto, debemos considerar el empleo de útiles matemáticos, particularmente las nociones de sistema concreto y sistema dinámico, como instrumentos formales en esas tareas. Después de un somero repaso de sus características generales, se bosqueja un esquema general para su inserción en el análisis de la relaciones sociedad-medio biogeofísico. Finalmente, se hacen apreciaciones sobre los temas tratados.

Las relaciones sociedad-medio ambiente

Las peculiaridades de uso del medio biogeofísico o biosfera[1] -vegetación, fauna, atmósfera, suelo y subsuelo, y cuerpos de agua- que una sociedad establece en la forma de ciudades, sistemas agropecuarios, redes de transporte, etcétera, representan respuestas posibles a la necesidad absoluta de adaptación al mismo medio, garantizando así la permanencia cultural y biológica de nuestra especie. Ello implica la apropiación de elementos bióticos y abióticos del medio, su transformación en bienes y servicios, la distribución y consumo de éstos y, finalmente, el vertido de desechos resultantes -o el reciclaje de materiales en su caso- hacia el mismo medio. En esto incurrimos ineludiblemente en gastos y disipación de energía, alteración de los ciclos biogeoquímicos, y degradación progresiva de las sustancias naturales utilizadas; afectando así la calidad de la biósfera como sustento vital y por ende el mismo bienestar humano. Los usos del medio para satisfacer necesidades humanas responden en gran medida a la forma de integración económica implícita en el tipo de desarrollo técnico-cultural que nuestra sociedad posee.[2]

La relación sociedad-medio ambiente (biogeofísico) puede concebirse, espacial y temporalmente, como una serie de procesos dinámicos, altamente complejos y retroalimentados que involucran, por un lado: *1)* a gran número de grupos sociales con relaciones de poder asimétricas y variados matices culturales, que interactuando en

[1] Francois Ramade. *Écologie des ressources naturalles*. Masson, París, 1981, cap. I, pp. 5-31.

[2] Nancy E. Langson. "People and Nature: Understanding the Changing Interactions Between People and Ecological Systems", en S. I. Dodson, et al. *Ecologf*. Oxford U. Press, Nueva York, 1998, cap. II, pp. 25-76.

múltiples situaciones persiguen sus propios intereses; y por otro: *2)* los sistemas y componentes de la biósfera que son intervenidos y perturbados directa e indirectamente con diferentes intensidades, en tales múltiples situaciones y acciones recíprocas humanas. Asimismo, es posible observar que esos procesos derivan en: *a)* patrones de conducta social que establecen el acceso a menudo desigual de los distintos grupos sociales e individuos a los recursos naturales disponibles, y a los bienes y servicios producidos mediante sus acciones recíprocas; y *b)* alteraciones en las propiedades, estructura y comportamiento -de los sistemas y componentes del medio biogeofísico- generadas por las acciones recíprocas humanas y por la propia dinámica interna de la biósfera.[3]

En esta perspectiva, cualquier discusión sensata (no reduccionista, consistente y completa) sobre el uso y contaminación humanos de la biosfera, así como de los estados de bienestar colectivo e individual que de ello resultan en nuestra sociedad, no puede separarse -como suele hacerse frecuentemente- de dos tipos de consideraciones (simultánea e igualmente importantes) sobre: *i)* las peculiaridades de la estructura y dinámica socio-económica, la historia, las ideologías, etcétera, característicos del grupo humano en cuestión; y *ii)* los fenómenos biogeofíscos, en el contexto de su propia dinámica interna, que irremediablemente afectan y son también afectados por las acciones humanas. Cualquier tratamiento de las relaciones sociedad-medio ambiente que soslaye estos aspectos bien pudiera considerarse no sólo incompleto sino gnoseológicamente inválido de principio.[4]

La gravedad de los problemas ambientales que nos rodean, semejantes al creciente deterioro del bienestar socio-económico, nos debieran impulsar al *desarrollo de esquemas teóricos y prácticos* que permitan abordamientos más significativos y eficaces sobre la problemática de la relación sociedad-medio biogeofísico. Lo que interesa es la permanencia humana a largo plazo basada en un *desarrollo socio-económico sustentable,* esto es, responder al uso de recursos naturales con miras a no dañar permanentemente ninguno de los procesos biogeofísicos que alimentan el flujo de recursos renovables y los servicios que nos proporcionan; asimismo, evitar el agotamiento de los recur-

[3] *Idem.*

[4] Gilberto Gallopín. "Ecología y Ambiente", en E. Leff (ed). *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental él desarrollo:* Siglo XXI Editores, México, 1986, pp. 126-172.

sos no renovables e impulsar continuamente las diversidades biológica y cultural. La intención principal es preservar y fomentar el potencial de la biósfera para satisfacer las necesidades y aspiraciones de generaciones *actuales y futuras,* por medio de arreglos socio-económicos equitativos a través de *espacio y tiempo*[5]

Cuestiones metodológicas

Asumiremos que el *conocimiento científico* es un conocimiento teorético confirmado (corroborado), formalmente explícito y cuyo contenido se ha reducido a conceptos como elementos de un lenguaje que expresa información proposicional semántica. En particular, el proceso teorético del conocimiento sobre las relaciones sociedad-medio (biogeofísico) se abocaría a lograr la representación abstracta (teoría científica) de los *patrones de comportamiento* que regularmente se perciben en los ámbitos de nuestro interés; según se desprende de lo discutido en la apartado anterior. Esto significa contar con un conjunto de enunciados hipotéticos sobre la clase de *fenómenos* que denominamos relaciones sociedad-medio; en el entendido que los enunciados hipotéticos debieran eventualmente ser puestos a prueba, atestiguados y confirmados a través de sus consecuencias.

Con mayor precisión lógica, siguiendo a H. Spinner, una teoría sobre las relaciones sociedad-medio debiera ser un *sistema sintáctico-semántico con relevancia pragmática*[6] *a esas relaciones concebidas como fenómenos* (véase apartado anterior). Como tal, la teoría pudiera caracterizarse según su *forma* y según su *contenido cognoscitivo.* Según su *forma* tendríamos conjuntos de frases, esto es: *1)* conjuntos de frases generales y especiales ordenados deductivamente; *2)* estructuras formales lógico-matemáticas, representadas por frases (o funciones de frases) y fórmulas; *3)* sistemas formalizados de tipo

[5] Enrique Beltrán. *La deterioración ambiental: enfoque ecológico.* IMRNR, México, 1971. Paul Ekins, "Making Development Sustainable", en W. Sachs (ed.). *Global Ecology:* Zed Books, Londres, 1993, cap. VI, pp. 91-104.

[6] En lógica y lingüística la *sintáctica* se refiere al estudio de los símbolos independientemente de su interpretación; la *semántica* estudia los símbolos en relación *al qué* y *al cómo* ellos significan; y, la *pragmática* estudia los símbolos en relación con lo que hacemos con ellos, dado el significado que ellos tienen.

axiomático-deductivo; y *4)* cálculos (no interpretados formales, sintácticos). A la vez, correspondiendo biunívocamente a cada número anterior, tendríamos que según su *contenido* contaríamos con conjunto de enunciados, esto es: *1)* complejos de conceptos y enunciados (interpretados semánticamente); *2)* sistemas de enunciados con pretensión de validez real, los cuales son informativos y están dominados por enunciados momológicos,[7] en principio son capaces de verdad y tienen carácter hipotético; *3)* sistemas de hipótesis con carácter primariamente nomológico y con los siguientes componentes nomológicos principales -correspondiendo al número *4)* arriba: {I} hallazgos empíricos (afirmaciones de hechos, constataciones empíricas); {II} generalizaciones de datos empíricos (generalizaciones empíricas); {III} enunciados-ley (hipótesis nomológicas); {IV} estipulaciones (convenciones, "definiciones" en sentido amplio); {V} principios metafíisicos universales. En esto, en general tendríamos constataciones hipotéticas con distinto grado de abstracción y universalidad, así como estipulaciones convencionales -brevemente hipótesis y convenciones.[8]

En suma, parafraseando a Abbagnano, una teoría científica sobre las relaciones sociedad-medio biogeofísico exhibiría las siguientes funciones: *a)* constituir un esquema de *unificación* sistemática para diferentes contenidos fenoménicos en el ámbito de las relaciones sociedad-medio. Este *grado de comprensibilidad* sería de vital importancia para juzgar su validez; *b)* ofrecer un conjunto de medios de *representación conceptualy simbólica* de los datos de observación (fenómenos de nuestros interés). Bajo este aspecto, aplicaríamos el criterio de la *economía de los medios conceptuales (la célebre navaja de Occam)*, o sea, simplicidad lógica; *c)* constituir un conjunto de *reglas de inferencia* que permitan la previsión de los datos de hecho. Esto sería considerado como una de las tareas fundamentales de nuestra teoría en tanto su capacidad de previsión sería criterio fundamental para su valoración.[9]

En este punto, bien puede plantearse la cuestión sobre los medios diponibles para configurar una teoría científica viable. Por razón de nuestros propósitos, de entre ellos concentraremos nuestra atención brevemente sobre las *metáforas y analogías.*

[7] El término se refiere a lo que está relacionado con *leyes científicas* o *leyes de la naturaleza,* en tanto éstas se consideran como descripciones idealizadas a las que los fenómenos se aproximan.

[8] Helmut F. Spinner. "Teoría", en H. Krings, et al. *Conceptos fundamentales de filosofía*. Tomo III: Herder, Barcelona, 1979, pp. 484-516.

[9] Nicola Abbagnano. *Diccionario de filosofía:* FCE, México (1961), 1996, pp. 1126-1129.

Actualmente se entiende la *metáfora* como un *tropo* que consiste en usar palabras con un sentido distinto del propio en virtud de una comparación tácita; aquí la palabra *tropo* designa una figura lingüística que consiste en usar palabras en un significado no habitual. Aristóteles dijo: "La metáfora consiste en dar a una cosa un nombre que pertenece a otra: transferencia que puede efectuarse del género a la especie, de la especie al género, de especie a especie o sobre las base de una analogía."[10] Por otro lado, la analogía tiene un sentido propio y restringido, requerido por el uso matemático o lógico (para el que vale *proporción)* de *igualdad de relaciones;* o un sentido de *extensión probable* del conocimiento mediante el uso de semejanzas genéricas que se pueden aducir entre diferentes situaciones, tal como es usado en la literatura filosófica.[11] Esto es, la analogía se puede tomar como similaridad de relaciones en términos abstractos o bien como semejanza entre cosas, dándosele en este último caso un sentido claramente metafórico. Para algunos ejemplos muy ilustrativos de metáforas y analogías en las ciencias nos referimos al lógico M.R. Cohen, en un capítulo sobre "La lógica de la imaginación".[12]

Este mismo autor opina lo siguiente sobre las matáforas: "En realidad, siempre que hablamos del entendimiento en actividad, ya sea seleccionando sus datos, percibiendo el mundo exterior, etcétera, estaremos haciendo uso de la metáfora, del mismo modo que lo hacemos cuando hablamos de cuerpos que se atraen y se repelen mutuamente;" y más adelante:

> Es prácticamente imposible expresarnos verbalmente o escribir en términos rigurosamente literales sin incluir las metáforas: no se pueden eliminar por completo de nuestro discurso, sea este científico o no. Esto se esclarece particularmente cuando tratamos de expresar consideraciones generales de un carácter nuevo o poco común. Porque ¿cómo podríamos aprender las nuevas relaciones si no fuera pensándolas con las antiguas categorías?... las metáforas no son simples recursos artificiales para hacer más vivo y poético el discurso, sino que también son necesarias para la aprehensión y la comunicación de nuestras ideas.[13]

[10] *Ibidem,* 800.

[11] *Ibidem,* 67.

[12] Moras R. Cohen. *Introducción a la lógica:* FCE, México (1952) 1985, pp. 109-131.

[13] *Idem.*

Igualmente, en relación con la formación de teorías en general y en particular en nuestro caso, consideramos importante la afirmación:

> Puede, pues, considerarse que la metáfora expresa la percepción vaga y confusa, aunque primaria, de identidad; y que por procesos subsecuentes de discriminación se tranforma en la aseveración clara de la identidad o del elemento (o relación) que poseen dos cosas diferentes. Esto nos sirve para explicar la función propia de las metáforas en la ciencia lo. mismo que en la religión y en el arte, y nos previene en contra de los argumentos a favor o en contra de las consideraciones expresadas en lenguaje metafórico.[14]

Resumiendo, *la imaginación tiene un papel fundamental en los procesos teoréticos científicos a través de metáforas y analogías,* tanto en los aspectos formales como de contenido cognoscitivo que arriba tratamos. La discusión general de estos temas tiene actualmente gran vigencia, muy particularmente en las ciencias de la computación (relacionada con la inteligencia artificial), las ciencias cognitivas, las matemáticas y la filosofía.[15]

Prosiguiendo con nuestro propósito, en lo que sigue destacaremos esencialmente el cariz formal (lógico-matemático) de la actividad teorética. Así, adoptando la exposición lógica de A.Guétmanova,[16] podemos en particular hacer las siguientes apreciaciones. La *analogía* es un razonamiento sobre la pertenencia a un objeto de un determinado indicio (o sea, una propiedad o relación) con base en la homología[17] de indicios sustanciales con otro. Con este razonamiento se atribuye a un objeto una propiedad o se trasladan relaciones. Según el carácter de la información trasladada de un objeto a otro (del modelo al prototipo), la analogía se divide en dos tipos: analogía de propiedades y analogía de relaciones.

[14] *Idem.*

[15] Véase entre otros: George Lakoff y Mark Johnson. *Philosophy in the Flesh: The EmbodiedMind andits Challenge to Western Thought*. Basic Books, Nueva York, 1999. Andrés Ortiz Oses y Patxi Lanceros (ed.). *Diccionario de Hermenéutica:* Universidad de Deusto, Bilbao, 1998.

[16] A. Guétmanova. *Lógica*. Editorial Progreso, Moscú, 1989, pp. 204-209.

[17] En general, se dice de dos objetos que son *homólogos* si existe una correspondencia, o son similares en posición, valor, estructura o función. *Homología* es una relación o correspondencia entre objetos homólogos, esto es, la calidad o condición de ser homólogo.

En la *analogía de propiedades* se examinan dos objetos singulares (o dos conjuntos de objetos homogéneos, dos clases), y los indicios transladados son propiedades de estos objetos.

El esquema de la analogía de propiedades en la lógica tradicional es:

El objeto A posee propiedades a,b,c,d,e,f.
El objeto B posee propiedades a,b,c,d

Es probable que el objeto B posea propiedades e,f.

En *la analogía de relaciones,* la información trasladada del modelo al propotipo caracteriza las relaciones entre dos objetos. Tenemos la relación *(aRa)* y la relación *(mR1n).* Son homólogas o análogas las relaciones R. y *R1,* pero *a* no es análogo a *m,* ni *b* a *n.*

Según el conocimiento deducido, los razonamientos análogicos pueden ser analogías rigurosas (conclusión cierta); analogía no rigurosa (conclusión probable); analogía falsa (conclusión falsa). El esquema de la analogía rigurosa (usado frecuentemente en ciencias y matemáticas) es:

El objeto A posee indicios a,b,c,d,e.
El objeto B posee indicios a,b,c.d.
El conjunto de los indicios a,b,c y d infiere necesariamente el e

El objeto B posee necesariamente el indicio e

Ampliando estas ideas, pero ya dentro del ámbito propiamente matemático, me voy a permitir glosar las opiniones del notable matemático contemporáneo J. P. Aubin[18] sobre estas cuestiones: *a)* la investigación científica está impulsada por una curiosidad insaciable, por el deseo de explorar buscando continuamente una *interpretación* cada vez mejor (aunque sea parcial) del mundo a través de la elaboración de *metáforas.* Así nace este sentimiento de familiaridad, innato o adquirido previamente por la educación, que nos proporciona la convicción interna de haber comprendido un fe-

[18] J. P. Aubin. *Initiation á l'analyse appliquée:* Masson, París, 1994, pp. xv-xix.

nómeno; *b)* a la par del lenguaje ordinario, las matemáticas facilitan la elaboración de *metáforas* para explicar un fenómeno dado al asociarle otro que es más familiar o considerado como tal. Son estas metáforas las que permiten explicar en última instancia la realidad relativa a un grupo social dado, que bien puede definirse como el *consenso social sobre un grupo de metáforas; c)* la construcción de *metáforas matemáticas* exige naturalmente el desarrollo autónomo de la propia disciplina con el fin de avalarnos de las teorías destinadas a ser substitutos -o asociados- de los fenómenos a ser explicados. Este es el dominio de las *matemáticas puras.* Pero ello no es todo: la asociación entre una teoría matemática y un fenómeno tiene un doble sentido: el primero, el más conocido, es la búsqueda dentro del *corpus* matemático de una teoría que pueda corresponder de forma tan precisa como sea posible al fenómeno en cuestión; este es el dominio de las *matemáticas aplicadas.* Pero otras disciplinas pueden a su vez procurar metáforas a las matemáticas, de donde surjan conceptos y razonamientos nuevos que posibiliten prefigurar soluciones y materializar nuevos modos de intuición: este es el dominio de las *matemáticas motivadas,* actividad que ha sido a menudo soslayada en esta segunda mitad del siglo en pos de la obtención de resultados inmediatos; *d)* la adecuación de estas metáforas a fenómenos de las relaciones sociedad-medio biogeofísico no sería, en todo rigor, sólo responsabilidad del matemático, sino también una cuestión *fiduciaria* (contando con la participación conjunta de conocedores del ámbito sociedad-medio), cuyo objetivo sería *un consenso* que requiere de la confianza que sólo la experimentación y la observación en esos contornos particulares pueden ofrecer, para extender nuestra aceptación o rechazo en un momento dado.

Es frecuente en matemáticas el uso de la palabra modelo para describir construcciones lógico-formales (teorías matemáticas) en diferentes contextos. Con el fin de simplificar la terminología adoptaremos en lo que sigue la definición de *modelo,* dada por R. Aris[19] en el campo de las *matemáticas aplicadas:* una colección de ecuaciones, E, es llamado *modelo del sistema prototipico, S,* si es que está formulado para expresar las leyes de S y cuyas soluciones pretenden representar algún aspecto del comportamiento de *S.* A pesar de la vaguedad de esta definición, por el momento nos será útil en tanto remarca el carácter formal de metáforas y analogías natemáticas. La noción de *sistema* será tratada en el apartado siguiente, a la par de comentarios adicionales sobre modelos.

[19] R. Aris. *Mathematical Modelling lechniques:* Pitman, Londres, 1979, pp. 1-5.

Debiera ahora resultar claro cuál es el emplazamiento funcional de las *metáforas y analogías matemáticas* dentro del marco de los *aspectos formales* característicos de las teorías científicas, en contraste con los aspectos de contenido cognoscitivo -según los discutimos anteriormente. Teorías y modelos matemáticos, como metáforas de orden lógico-formal, servirían *operacionalmente* como fundamentos, bosquejos, sugerencias o elementos mismos, según sea el caso, en la instrumentación de la estructura formal de tales teorías. Esa estructura formal, recordémoslo, tiene que ver con requerimientos sobre: *1)* conjuntos de frases generales y especiales ordenados deductivamente; *2)* estructuras lógico-formales representadas por frases (o funciones de fiases) y fórmulas; *3)* sistemas formalizados de tipo axiomático-deductivo; y *4)* cálculos (no interpretados formales, sintácticos). Para mayor especificidad repasemos aquí las aclaraciones de M.Bunge[20] sobre estos menesteres: *a)* la matemática provee a todas las ciencias un esqueleto formal prefabricado (teorías y modelos) que puede rellenarse con cualquier contenido cognoscitivo empírico compatible con la estructura formal; *b)* la matematización de los conceptos y de las proposiciones incrementa la exactitud y por lo tanto la claridad de las ideas; *c)* una teoría o modelo matemático posee un poder deductivo ajeno a una doctrina verbal: en ésta las inferencias son laboriosas y a menudo inseguras, ya que no se sabe bien cuáles son las premisas; *d)* la precisión y el poder deductivo aumentan la verificabilidad de la teoría: se facilita la derivación de conclusiones exactas, las que se pueden confrontar con datos empíricos; *e)* la teoría bajo construcción se puede ordenar mejor y, en particular, se puede axiomatizar; f) el mejor ordenamiento lógico y la facilitación de la contrastación empírica hacen a su vez más fácil la comparación de la teoría dada con teorías rivales.

Como colofón, es necesario reconocer el papel esencial que *teorías y modelos (metáforas y analogías) matemáticos* debieran jugar lógica y formalmente en la construcción de teorías científicas viables, cuyos *contenidos cognoscitivos* son las relaciones sociedad-medio biogeofísico según hemos concebido éstas en el apartado anterior. Ante la carencia de teorías y modelos matemáticos particulares que sean susceptibles de aplicación en un caso dado, es natural pensar ya sea en su eventual desarrollo (las *matemáticas mopivadas* de Aubin), o cuando menos sujetar nuestros marcos conceptuales y argu-

[20] Mario Bunge. *Epistemología,* 2a. ed: Siglo XXI Editores, México, 1997, p. 159.

mentos teóricos a un *tratamiento lógico simbólico*[11] que facilite su análisis y discusión con transparencia. En la perspectiva del conocimiento científico que hemos planteado, la lógica simbólica y la matemática forman ámbitos distintos pero intensamente relacionados, abrevando a la par en el mismo origen mental, siendo la primera de mayor generalidad que la segunda, según nos refiere W V. Quine.[22]

Nociones de sistema concreto y sistema dinámico

En este apartado plantearemos los aspectos básicos de las nociones de *sistema concreto* y *sistema dinámico,* según surgen en la teorías matemáticas aplicadas de sistemas y procesos de mando[23] -estamos ahora en el ámbito de las *matemáticas aplicadas* de Aubin. Consideramos que esas nociones son valiosas como metáforas matemáticas para estructurar formalmente teorías sobre las relaciones sociedad-medio biogeofísico, *vis-a-vis* su contenido cognoscitivo. La idea es bosquejar cómo construir modelos matemáticos de las relaciones sociedad-medio biogeofísico empleando sistemas concretos y sistemas dinámicos. Sin embargo, junto con J. Aracil, pensamos de esos modelos matemáticos más bien como instrumentos de estrategia cognitiva que como aproximación reduccionista al conocimiento de tales relaciones.[24] Es necesario advertir que esos útiles matemáticos sólo son parte de una gran variedad de ellos que potencialmente pudieran utilizarse para ese efecto.

En su acepción más general, entendemos que un *sistema* es un objeto complejo cuyas partes o componentes están relacionadas de tal modo que se comporta en ciertos respectos como una unidad y no como un mero conjunto de elementos. En particu-

[21] Manuel Garrido. *Lógica simbólica.* 3a. ed.: Tecnos, Madrid, 1997.

[22] W. V. Quine. *Methods of Logic.* 4a. ed.: Harvard University Press, Cambridge, 1982, pp. 1-5.

[23] Javier Aracil. *Máquinas, sistemas y modelos:* Tecnos, Madrid, 1986. George J. Klir. *Facéis of Systems Science:* Plennum Press, Nueva York, 1991. M. D. Mesarovic y Y Takahara. *General Systems Theoiy: Mathematical Foundatios:* Academic Press, Nueva York, 1975. Jan A. Spriet y Ghislam C. Vanteenkiste. *Computer-aided Modelling and Simulation:* Academic Press, Londres, 1982. Stephen Bennet. *Introduction to Mathematical Control Theory:* Oxford University Press, Londres, 1975.

[24] Javier Aracil. "Notas sobre el significado de los modelos informáticos de simulación", en Fernando Broncano (ed.). *Nuevas meditaáones sobre técnica:* Editorial Trotta, Madrid, 1995, pp. 53-80.

lar, diremos que los *sistemas concretos* son aquellos sistemas cuyos componentes son objetos concretos o cosas. Pero, dado un conjunto de objetos, ¿cómo podemos asegurar que estamos frente a un sistema concreto? Bunge[25] establece los siguientes criterios para separar meros agregados (de objetos) de sistemas concretos: *Vrimer criterio:* una cosa es un sistema concreto si y sólo si se comporta como un todo en ciertos respectos, o sea, si tiene leyes propias en cuanto totalidad. *Segundo criterio:* una cosa es un sistema concreto si y sólo si su comportamiento cambia apreciablemente cuando se quita uno de sus componentes o se lo reemplaza por otro de clase diferente. Los componentes de un sistema concreto están *acoplados o ligados o conectados entre sí*, en tanto ellos actúan unos sobre los otros o interactúan entre sí.

Con mayor precisión, siguiendo a Bunge, definimos una cosa *S* como un *sistema concreto* si sólo *S* es representable adecuadamente por la terna ordenada de conjuntos:

$$M = \langle \textit{composición de } S, \textit{ ambiente de } S, \textit{ estructura de } S \rangle$$

donde

i) La *composición de S* es el conjunto de las partes de *S*, conjunto que contiene por lo menos dos elementos. Las partes se definen mediante sus propiedades características o atributos, a las que a menudo se les asocian magnitudes.
ii) El *ambiente de S* es el conjunto de cosas concretas, distintas de los componentes de *S*, que están conectados con éstos, o sea, que actúan sobre *S* o son afectados por *S*.
iii) La *estructura de S* es el conjunto de relaciones entre componentes de *S*, así como entre éstos y componentes del ambiente de *S*, y tal que dicho conjunto incluye por lo menos una conexión o acoplamiento. Esto es, los componentes están vinculados entre sí debido a propiedades de interacción entre ellos, que se traducen normalmente en expresiones matemáticas formales entre las magnitudes correspondientes, que se recogen en la *estructura* de *S*.

Nos interesan los sistemas concretos cuyos componentes no están ligados estáticamente sino que interactúan dinámicamente formando cosas nuevas. Por otro lado,

[25] *Op. cit.*, pp. 98403.

distinguiremos entre dos tipos de propiedades principales de los sistemas, las *resultantes o hereditaria?,,* y las *emergentes o colectivas* :[26] a) *P* es una *propiedad resultante o hereditaria de* un sistema *S* si y sólo si también algunas componentes de *S* poseen *P;* b) *P* es una propiedad *emergente o colectiva* de S si y sólo si ningún componente de *S* posee *P.* Diremos de paso que lo que caracteriza a los sistemas concretos de nuestro interés es precisamente que exhiben la segunda propiedad.

El hecho de que podamos considerar -por medio de un proceso de descomposición recursiva— que sistemas dados estén, a su vez, compuestos de sistemas de menor jerarquía (que a su vez pueden descomponerse en otros sistemas, y así sucesivamente), nos lleva pensar en dotar a esos sistemas componentes de un medio o *superficie de contacto (interface)* a través de la cual puedan interactuar con otros sistemas. La superficie de contacto debiera representar los eventos potenciales que pueden ocurrir en la frontera del sistema. Lo que ocurre en esa frontera está determinado tanto por el sistema mismo (dentro de su frontera) como por su ambiente (fuera de su frontera). Así, la operación del sistema surge de las restricciones que él impone sobre la superficie de contacto; esto es, depende de lo que hemos denominado su estructura interna.[27]

Para detener, en un momento dado, el proceso de descomposición recursiva de un sistema es necesario concretizar su estructura interna, o en caso contrario continuar la descomposición tanto como se desee. La estructura interna del sistema será fielmente concretizada siempre y cuando sea reconstituida combinando las restricciones separadas que las estructuras internas de cada uno de los sistemas componentes ejercen mutuamente entre sí. Un sistema está sujeto a descomposición si y sólo si tal reconstitución es posible con la descomposición dada.

Los fenómenos sociedad-medio biogeofísico involucran, de hecho, flujos de materia, energía e información, entre las partes dinámicamente interactúantes de complejos jerarquizados que consisten de actividades humanas y procesos biogeofísicos. Para ciertos propósitos especiales de estudio, está claro que algunos conjuntos particulares de estos complejos jerarquizados bien pudieran subsumirse definitivamente en el género de los sistemas concretos, siempre y cuando sea posible definir sus respectivas composiciones, entornos y estructuras. Así, como tales, recibirían de su entorno -a ciertos tiempos- energía, materia e información y, a su vez, otros tiem-

[26] Bunge, *op.* «'/., p. 115.

[27] Spriet y Vansteenkiste, pp. 12-22.

pos producirían y emitirían algo hacia su entorno; esto es, estarían interactuando con su entorno.

Exploraremos ahora una definición de *sistema dinámico* que es estándar en las teorías matemáticas aplicadas de sistemas y procesos de mando.[28] Un *sistema dinámico* se concibe como una *estructura matemática asociada o adjunta a un sistema concreto.* Los eventos que ocurren en el sistema concreto pueden tener lugar continua o discretamente en el tiempo y deberán ser reflejados fielmente en su ástema dinámico adjunto.[29]

La explicación de nuestra definición será informal e intuitiva, difiriendo en algunos puntos importantes de la definición axiomatizada de sistema dinámico que es común en la literatura matemática general en la que, además, mediante definiciones y convenciones auxiliares se desarrollan teorías extensivas sobre los sistemas dinámicos "abstractos".[30] Nuestra presentación incluye, aparte de variables de estado, variables de mando o control y variables de salida. Estas últimas normalmente están ausentes en las discusiones de sistemas dinámicos "abstractos", donde los sistemas dinámicos son autónomos, esto es, solamente referibles a "sistemas físicos cerrados"; mientras que en nuestra presentación nos referimos siempre a *sistemas concretos* que por definición son "abiertos", esto es, que interactúan con su entorno.

Aquí seguiremos las pautas generales en las matemáticas aplicadas (en particular el enfoque de RE. Kalman, *et al)* orientadas al tratamiento de problemas en las ciencias físicas y la ingeniería, las ciencias biológicas y la medicina, las ciencias administrativas y la economía. A pesar de su vena aplicada, este enfoque está inspirado y condicionado necesariamente (como se puede constatar ampliamente) en aspectos fundamentales que se encuentran en el tratamiento axiomatizado de los sistemas dinámicos "abstractos"[31]

[28] R. E. Kalman, P. L. Falb y M. A. Arbib. *Tapies in MathematicalSystems Theory:* McGraw-Hill, Nueva York, 1969, pp. 1-13.

[29] De forma redundante, un *sistema dinámico* es una estructura formal, matemática, que es un modelo de un *sistema concreto.*

[30] Mathematical Society of Japan / K. Itó (ed.). *Encyclopedic Dktionaty of Mathematics.* 2a. ed.: MIT Press, Cambridge (1993), 1996, pp. 487-503. N. P. Bhatia y O. P. Szegó, *Dynamkal Systems: Stability Theory and Applicatios:* Springer Verlag, Nueva York, 1967.

[31] Comparar Kalman, *et al.* con Mathematical Society of Japan/ Itó. y Bathia y Szegó. Ello no puede ser de otra manera en la medida en que lo que aquí tratamos son *matemáticas aplicadas* basadas en *matemáticas puras,* para usar otra vez la terminología de Aubin.

De cualquier manera, nuestro concepto matemático de sistema dinámico A como caracterización formal adjunta a un sistema concreto *S* incluye un conjunto tiempo Tasociado. A cada momento del tiempo *t ET*nuestro sistema concreto *S* recibe un insumo *u(t)* y emite un producto *j(i): esto caracteriza las interacciones entre sistema concreto S y su entorno.*

Asumiremos que los valores del insumo se toman de algún conjunto *U* fijo; esto es, a cualquier tiempo / el símbolo *u(t)* puede escogerse de *U.* En general, no se permite que los segmentos de insumo de un sistema concreto sean funciones arbitrarias G): $(tj ,t_2]$ —> *U,* sino que deben pertenecer a alguna clase Q. La selección de *Q* puede inferirse de consideraciones físicas, sin embargo, frecuentemente es dictada por consideraciones matemáticas. Cada valor del producto *y(t)* pertenece a algún conjunto fijo *Y,* y sólo se imponen restricciones muy débiles sobre los segmentos de salida "permisibles" y: $(t_2 ,t_\}]$ -> *Y.* Tanto los insumos *u(t)* como los productos *j(t)* caracterizan las interacciones del sistema concreto *S* con su propio ambiente, a través de una superficie de contacto. Aquí consideraremos a *u(t) ej(t)* como vectores de dimensión finita, esto es $u(t)$ - $(u\text{^}t)$, $u_2(t),..., ujt))$ $ej(t) = (yft), y_2(t), -,y_n(t))$.

Recordemos que admitimos que lo que ocurra en la superficie de contacto (transferencia de insumos *u(t)* y productos*y(t)*) está determinado tanto por el sistema mismo como por su ambiente, y que la operación del sistema depende de su estructura interna, esto es, de las restricciones que él imponga sobre la superficie de contacto. Ahora bien, quizás no podremos establecer*y(t)* en tanto no conozcamos más que el insumo presente *u(t).* La historia de los insumos al sistema *S* puede haberle alterado de tal forma que su producto se vea modificado. En otras palabras, la salida *y(t)* de *S* depende en general tanto del insumo presente *u(t)* como del pasado o la historia de *S.* Decimos, por tanto, que el producto presente *y(t)* depende del *estado* de *S,* y definimos el *estado presente, x(t), de S* intuitivamente como la parte del presente y el pasado de *S* que es relevante para determinar el producto presente y productos futuros. Esto es, concebimos el *estado de S* como algún *atributo interno de S* al momento presente, *x(t),* que determina el producto presente *y(t)* y afecta los productos futuros. Intuitivamente, el estado puede considerarse como un tipo de almacén de información o memoria, o como acumulación de causas pasadas.[32] Así, *el concepto de estado caracteriza*

ídem.

a los componentes de Sy a sus variaciones en el tiempo. También en este trabajo consideraremos al estado $x(t)$ como un vector de dimensión finita: $x(t)$ - (xft), $x_2(t)$,..., $x.(t))$.

Entonces, el estado del sistema es la información necesaria para prever su evolución futura. A veces, esta información consiste en el valor que toma en el instante un subconjunto (o el propio conjunto) de los atributos asociados con los componentes del sistema. Pero, en general, el estado sólo está formado por una parte de los atributos. Se exige que el conjunto $\{x(t)\}$ de estados internos de *S* sea lo suficientemente rico para mantener toda la información sobre la historia de *S* que se requiere para predecir el efecto del pasado sobre el futuro. Normalmente, se supone que el estado contiene el *mínimo* de información para tal propósito.

Para hacerse digno del apelativo "dinámico", el sistema dinámico A adjunto al sistema concreto *S* debe poseer una propiedad adicional: conocimiento tanto del estado $x(t.;)$ como del segmento de entradas CO = CO $(tp\ t_2)$ debe ser necesario y suficiente para determinar $x(tf)$, cuando $t_1 < t_2$. Esto es, debe existir un mapeo ⓙ tal que $x(t$^-^$\{t_2;\ t_p\ xfa)$, ©), cuando $t_1 < t_2$. Al mapeo ⓙ lo denominaremos *función de transición de estado.* Debemos observar que esto requiere que el conjunto tiempo T sea ordenado, esto es, que exista un dirección preferida del tiempo, asumiendo que el pasado precede al futuro. Con esta convención el término "dinámico" tiene un significado similar a "causal": el pasado influencia el futuro pero no a la inversa. En suma, la noción matemática de un sistema dinámico A pretende describir el flujo de causación del pasado al futuro del sistema concreto *S.* Para un tratamiento formal de estos temas no referimos a R. E. Kalman, *et alP*

Usualmente, al conjunto $\{x(tj\}$ se le llama el *espacio de eventos* o *espacio de fases* de *S;* a la función de transición de estados ⓙ también se le conoce como *trayectoria, desplazamiento, órbita, flujo, solución* (en el caso, digamos, de una ecuación diferencial o en diferencias finitas). También se dice que el insumo o control © *mueve, toma, transfiere, lleva, transforma* el estado $x(t_i)$ al estado $x(tf)$ - ()($t_2;\ t_i$, $x(tj)$, Cü). Vagamente no referimos a ⓙ como el *desplazamiento del sistema.* En aplicaciones concretas, estas nociones toman formas matemáticas específicas de entre una gran variedad.[34] Aquí nos referiremos como ilustración, solamente, a los formalismos en términos de ecuaciones

[33] *ídem.*

[34] Richard Bellman. *Adaptive ControlProcesses:* Princeton Umversity Press, Princeton, 1972, pp. 3-12. Spnet y Vansteenkiste, pp. 13-54.

diferenciales y de diferencias finitas ordinarias,[35] sin consideraciones adicionales sobre el azar e incertidumbre.

La aplicación de las metáforas matemáticas de los sistemas concretos y sistemas dinámicos a los fenómenos de las relaciones sociedad-medio biogeofísico tendría como propósito esencial estudiar su comportamiento asumiéndolos como *sistemas concretos S* que cambian con el tiempo (es decir, que los atributos principales asociados a ellos sufren variaciones); y que nos interesa *dar ra^ón* de esos cambios -buscamos una descripción racional del comportamiento- usando *sistemas dinámicos* A como modelos explicativos de *S.* Además supondríamos que el cambio resulta fundamentalmente de las tensiones que se producen en el seno de los sistemas y en sus superficies de contacto, tal como éstos sean definidos. Por *comportamiento* entenderemos la evolución a lo largo del tiempo de las magnitudes que se consideran relevantes, tales como estados (atributos) *x(t),* insumos *u(t),* productos *j(t),* y otras, que caracterizan los fenómenos en cuestión formalizados como sistemas dinámicos A referidos a un sistema concreto *S.* Frecuentemente daremos el nombre de *trayectoria* a la evolución temporal de tales variables, cuyas representaciones gráficas *muestran* el comportamiento del sistema.

De hecho, de acuerdo con la terminología del apartado anterior, estaríamos usando a los sistemas dinámicos A como modelos matemáticos de los fenómenos (sistema concreto *S* prototípico) de nuestro interés en las relaciones sociedad-medio biogeofísico, donde en (este trabajo) la colección de ecuaciones X del modelo especifican al sistema dinámico A en términos de ecuaciones diferenciales o de diferencias finitas ordinarias, y que expresan *las leyes de evolución y estructura de S,* y cuya solución (el sistema dinámico mismo) representa el comportamiento de *S.*

Como ilustración, usando el formalismo específico de ecuaciones diferenciales ordinarias un sistema dinámico A se expresaría en forma vectorial de la siguiente manera:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f\,(x(t),u(t)) \qquad [1]$$

$$y(t) = g(x(t),u(t)) \qquad [2]$$

[35] Aracil, *op. cit.*

$$x(0) = x_0 \qquad [3]$$

donde [1] implica que la *función de transición de estado* ϕ del sistema dinámico sería la solución de la ecuación diferencial, cuando el operador diferencial *d/dt* en este caso actúa como tasa de cambio *j f* es la *función de tasa de cambio,* expresando así la supuesta *ley de evolución del sistema concreto S.* Asimismo, *{u(t)}* es el conjunto de insumos, *{x(t)}* es el conjunto de estados o atributos y *{y(t)}* es el conjunto de productos. En [2] *g* es la función de salida, y [3] establece las *condiciones iniciales* que guarda el estado del sistema al tiempo inicial t = 0. La solución del modelo E([l],[2],[3]), en la forma de la función de transición de estado ϕ del sistema dinámico, nos representaría el comportamiento del *sistema concreto S* así modelado.

En casos particulares de aplicación, el modelo E([l],[2],[3]) adquiere una forma explícita, y entonces para garantizar la utilidad matemática del modelo será necesario establecer de antemano si constituye lo que se denomina "un problema bien planteado", esto es: *i)* probar que el sistema tiene solución; *ii)* probar que la solución es única; y, *ai)* probar que la solución depende continuamente sobre el valor inicial del estado y sobre los parámetros en las expresiones explícitas. Esto permitirá la simulación numérica (con computador digital) del sistema dinámico especificado por E([l],[2],[3]), así como cualquier tratamiento analítico que se le quiera dar, contando con la seguridad de obtener respuestas significativas. En general, lo mismo se aplica para otros tipos de ecuaciones.

Es menester hacer algunos comentarios adicionales sobre el modelo E([l],[2],[3j).

De las ecuaciones [1], *[2]* y [3] se puede inferir que sobre el cambio a lo largo del tiempo de la variable vectorial $x(t)$-$(x_i(t), x_2(t),..., x.(t))$, y consecuentemente de la *van^ble* $j(t)=(y_1(t), j_2(l)> —>J_„(t))>$ influyen tanto la misma variable *x(t)* como la variable *u(t)* que aparecen como argumentos de las funciones vectoriales/ *yg.* Por tanto, en la formulación de un modelo de este género subyace el concepto de *influencia entre variables.* A cada influencia puede asociarse un enunciado de la forma *X —> Y (X* influye sobre Y), lo que equivale a decir que a una variación provocada en *X* se responde con otra de *Y.* El concepto de influencia tiene un carácter más débil que el de causalidad, y en este sentido es que se emplea en la modelación de sistemas dinámicos. En las tareas de modelación seleccionamos aquellas influencias entre variables que pensamos nos llevarán a generar el comportamiento general del sistema concreto en términos de un sistema dinámico.

Como complemento ilustraremos el formalismo de las ecuaciones ordinarias en diferencias finitas para especificar un sistema dinámico A (aquí el tiempo varía discretamente, aunque los valores de las variables son continuos):

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) \quad [4]$$

$$y_{k+1} = g(x_k, u_k) \quad [5]$$

$$x_0 = x \quad [6]$$

ahora el sistema dinámico está especificado por S([4],[5],[6]), y es posible -así como para las ecuaciones diferenciales ordinarias- encontrar una solución analítica aunque ello no es muy frecuente en los casos de interés, orillándonos las más de las veces al tratamiento numérico.

Finalmente, debemos mencionar que el tratamiento de los sistemas dinámicos admite dos enfoques: uno analítico, marcadamente cuantitativo, y otro *cualitativo* de carácter más geométrico y topológico, pero no por ello menos formal.[36] Así, observamos distintas formulaciones de los sistemas dinámicos, así como distintas interpretaciones, que eventualmente nos pueden servir para representar los sistemas concretos subyacentes en las relaciones sociedad-medio biogeofísico en toda su riqueza y variadas peculiaridades.

Comentarios finales

Hemos planteado la necesidad de aproximarnos teóricamente al estudio de los fenómenos de las relaciones sociedad-medio biogeofísico mediante la construcción de una estructura formal con base en las metáfora matemática de los sistemas concretos y sistema dinámicos. El uso de la teoría matemática aplicada de sistemas y procesos de mando cuenta con extensas aplicaciones, tanto en las ciencias ambientales como en las ciencias económico-administrativas, pero es precisamente en el ámbito de las re-

[36] Mathematical Society of Japan / Itó, *op. cit.*, pp. 487-503.

laciones sociedad-medio biogeofísico donde apoyamos que nuevas aplicaciones tengan lugar. Nuestro interés ha sido argumentar cómo los útiles matemáticos de sistema concreto y sistema dinámico exhiben los matices metafóricos y lógicos idóneos para instrumentar con ellos una estructura formal adecuada, que sustente teorías significativas sobre las relaciones sociedad-medio biogefísico. Existen ya intentos importantes en ese sentido.[37]

[37] P. M. Alien y B. E. Paulré (ed.). "Special Issue on New Approaches in Dynamical Systems Modelling", en *Environmental Planning and Design B: Planning and Design.* 1 (12) 1985. C. A. S. Hall y J. W. Day (ed.). *Ecosystem Modeling in Theory and Practice:* John Wiley, Nueva York, 1977.