

1. CÓDIGO DE LA COMUNICACIÓN 315

2. TÍTULO COMPLETO

**PANORAMA DE MODELOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

3. EJE TEMÁTICO

11. GESTIÓN TECNOLÓGICA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

4. AUTORES:

Gallón, Luciano

Universidad Pontificia Bolivariana

l.gallon@ieee.org

Colombia

Gómez, Diego

ECSIM

dirección@ecsim.org

Colombia

Barceló, Miquel

Universitat Politècnica de Catalunya

blo@lsi.upc.edu

España

RESUMEN

PANORAMA DE MODELOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

*GALLÓN Luciano**, *GÓMEZ Diego*** y *BARCELÓ Miquel****

*Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)

l.gallon@ieee.org, Circular 1 N° 70 - 1, Bloque 11. Medellín, Colombia

**Centro de Estudios en Economía Sistémica (ECSIM)

direccion@ecsim.org, Carrera 10 N° 19 Sur - 196 Int.39, Medellín, Colombia

***Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

blo@lsi.upc.edu, Campus Nord, A0, Despatx 129, c/ Jordi Girona 1-3, 08034, Barcelona, España

Resumen

En el año 2007 se cumplieron 50 años de la aparición de un campo novedoso para el pensamiento humano: la Dinámica de Sistemas, considerada, tal vez, como la principal tecnología sistémica. En el 2008 se cumplieron 40 años de la aparición del Club de Roma fundado por Aurelio Peccei y varios de sus colegas con el fin de estimular nuevas investigaciones de la problemática global desde una visión científica y completa. Los logros de Jay W. Forrester en 1957 y de Peccei en 1968 vienen a ser los pilares fundamentales del modelado con dinámica de sistemas. En retrospectiva, es difícil creer que cuando se fundó el Club de Roma, no se tenía idea alguna de cómo se podrían hacer las investigaciones que proponía. Es decir, los asuntos relacionados con los modelos y el modelado con dinámica de sistemas son muy recientes para la humanidad, siendo difícil hallar referentes particulares más atrás de mediados del siglo XX, y aunque el aparato matemático para solucionar ese tipo de problemas existía desde inicios del siglo XIX, sólo se logró cerrar el flujo de análisis y síntesis de la cadena sistema-idea-modelo-dinámica-simulación-sistema con las innovaciones en Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) de la era digital electrónica. Este trabajo hace un recuento detallado, a modo de panorama de línea de tiempo, de modelos desarrollados por diferentes individuos, grupos, instituciones o empresas en los últimos 50 años y los clasifica además con referentes desde el desarrollo sostenible, con el propósito de apoyar la innovación de metodologías o procesos de investigación o gestión.

Palabras clave

Dinámica de sistemas; Modelado; Desarrollo sostenible; Sostenibilidad.

TRABAJO COMPLETO

PANORAMA DE MODELOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

*GALLÓN Luciano**, *GÓMEZ Diego*** y *BARCELÓ Miquel****

*Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)

l.gallon@ieee.org, Circular 1 N° 70 - 1, Bloque 11. Medellín, Colombia

**Centro de Estudios en Economía Sistémica (ECSIM)

direccion@ecsim.org, Carrera 10 N° 19 Sur - 196 Int.39, Medellín, Colombia

***Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

blo@lsi.upc.edu, Campus Nord, A0, Despatx 129, c/ Jordi Girona 1-3, 08034, Barcelona, España

Resumen

En el año 2007 se cumplieron 50 años de la aparición de un campo novedoso para el pensamiento humano: la Dinámica de Sistemas, considerada, tal vez, como la principal tecnología sistémica. En el 2008 se cumplieron 40 años de la aparición del Club de Roma fundado por Aurelio Peccei y varios de sus colegas con el fin de estimular nuevas investigaciones de la problemática global desde una visión científica y completa. Los logros de Jay W. Forrester en 1957 y de Peccei en 1968 vienen a ser los pilares fundamentales del modelado con dinámica de sistemas. En retrospectiva, es difícil creer que cuando se fundó el Club de Roma, no se tenía idea alguna de cómo se podrían hacer las investigaciones que proponía. Es decir, los asuntos relacionados con los modelos y el modelado con dinámica de sistemas son muy recientes para la humanidad, siendo difícil hallar referentes particulares más atrás de mediados del siglo XX, y aunque el aparato matemático para solucionar ese tipo de problemas existía desde inicios del siglo XIX, sólo se logró cerrar el flujo de análisis y síntesis de la cadena sistema-idea-modelo-dinámica-simulación-sistema con las innovaciones en Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) de la era digital electrónica. Este trabajo hace un recuento detallado, a modo de panorama de línea de tiempo, de modelos desarrollados por diferentes individuos, grupos, instituciones o empresas en los últimos 50 años y los clasifica además con referentes desde el desarrollo sostenible, con el propósito de apoyar la innovación de metodologías o procesos de investigación o gestión.

Palabras clave

Dinámica de sistemas; Modelado; Desarrollo sostenible; Sostenibilidad.

1 Introducción

En la elaboración de modelos de Sistemas Sociales, Ecológicos y Económicos (SSEE) el propósito puede tener un rango que va desde el desarrollo de modelos conceptuales simples, con el fin de proporcionar un entendimiento general del comportamiento de un sistema, hasta las aplicaciones detalladas y muy realistas encaminadas a la evaluación de propuestas de políticas concretas (COSTANZA; GOTTLIEB, 1998).

No es apropiado pues juzgar toda esta gama de posibles modelos y modelados de SSEE con los mismos criterios. Como mínimo son necesarios tres: realismo, precisión y generalidad, que se explicarán más adelante.

Se ha encontrado que se topa con una gran dificultad cuando con un modelo individual se pretenden maximizar esos tres criterios, y es por eso que la selección de los objetivos a perseguir con el modelado depende de los propósitos fundamentales que defina quien modela (COSTANZA; et al, 1993).

Lo anterior se hace sobresaliente cuando el problema en cuestión está relacionado con la investigación de la estructura y dinámica de un SSEE del y en el que no es posible realizar estudios de largo plazo o manipulaciones experimentales (COSTANZA; VOINOV, 2001) como es el del planeta Tierra o alguno de sus ecosistemas. Es precisamente ese el problema medular del desarrollo sostenible.

2 El Desarrollo Sostenible

Si bien la mitad del siglo XX fue el punto de quiebre a partir del cual, después de la II guerra mundial, parte de la humanidad decidió revisar su rumbo y empezar a pensar racionalmente en su desarrollo y los riesgos asociados, es decir en sus futuros posibles, es tal vez sólo hasta la década de 1980 que se llega a verdaderos avances intelectuales al respecto y en aparente consenso.

La cuestión que se planteó entonces no fue ¿el desarrollo y las preocupaciones ambientales se contradicen entre sí? sino ¿cómo lograr el desarrollo sin dañar el ambiente?, ¿cómo se puede lograr el desarrollo sostenible? (LÉLÉ, 1991). La gran crítica que se hizo (LÉLÉ, 1991) giraba en torno a que el desarrollo sostenible se había convertido en un artículo de fe, algo sectario; utilizado a menudo, pero poco explicado. Parece que la situación no ha cambiado desde entonces.

Literalmente pensado, el desarrollo sostenible significa simplemente aquel desarrollo que puede mantenerse, ya sea indefinidamente o durante un período de tiempo

implícito de preocupación u observación. El punto a destacar es que el desarrollo es un proceso de cambio dirigido, por lo tanto sus definiciones incluyen, o deben incluir, tanto los objetivos del proceso como los medios para alcanzarlos. Por lo tanto, la mayoría de los proponentes del desarrollo sostenible (o sostenibilidad más recientemente) lo toman de esta forma (LÈLÈ, 1991): La existencia de las condiciones ecológicas necesarias para soportar la vida humana en un determinado nivel de bienestar a través de las generaciones futuras.”

Esta es precisamente a la que llama Lèlè la sostenibilidad ecológica. Sin embargo ésta es sólo una parte del desarrollo sostenible pues también está la sostenibilidad social (LÈLÈ, 1991) definida como: “La capacidad de mantener valores sociales, tradiciones, instituciones, culturas, u otras características sociales deseadas.”

Este no es un uso muy común y es necesario distinguirlo cuidadosamente del contexto en el que los científicos sociales hablan de la sostenibilidad, a saber, los aspectos sociales de la sostenibilidad ecológica. La Figura 1 ayuda a diferenciar estas concepciones.

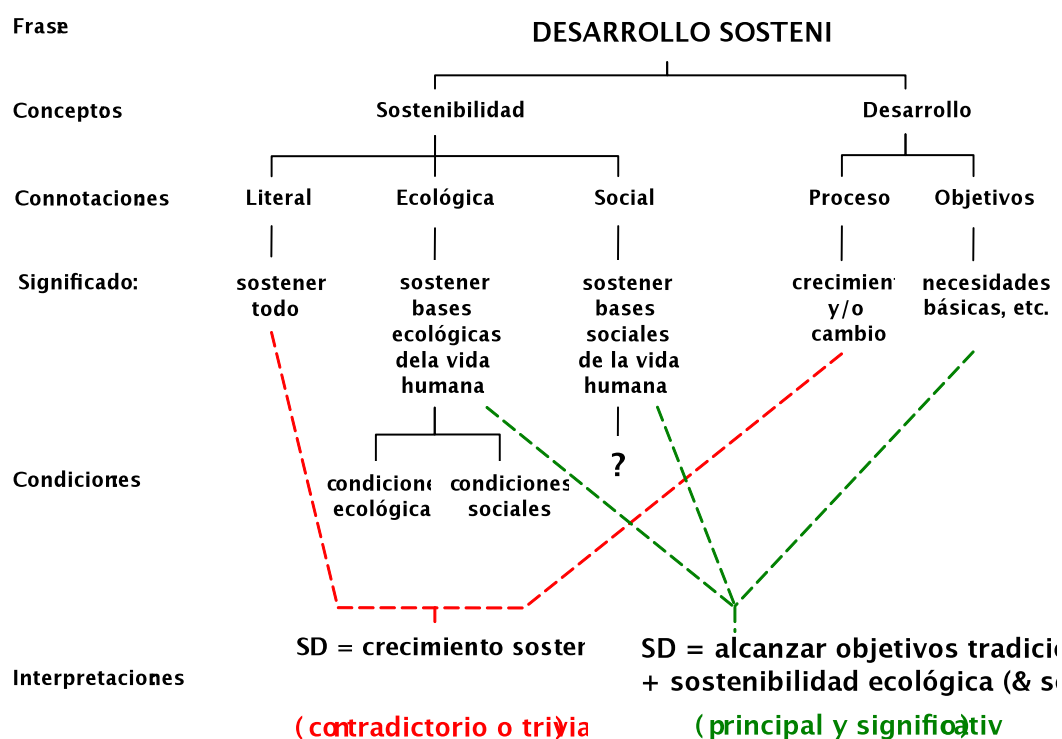


Figura 1. Las interpretaciones del desarrollo sostenible.
(Lèlè 1991)

El desarrollo sostenible se puede entender también como una forma de cambio

social que, además de los objetivos de desarrollo tradicionales, tiene el objetivo, o la limitación, de la sostenibilidad ecológica. Surgen entonces una serie de interrogantes (LÈLÈ, 1991):

- ¿Cuáles son los objetivos tradicionales del desarrollo, y cómo se han ampliado o modificado para incluir la sostenibilidad?
- Si la búsqueda de los objetivos tradicionales del desarrollo ha debilitado a la sostenibilidad ecológica en el pasado, ¿qué nuevas ideas sugieren que tales debilitamientos o contradicciones se pueden evitar ahora y en el futuro?
- ¿Cómo ayuda esto a construir un consenso entre las diferentes preocupaciones fundamentales?

El término desarrollo sostenible entró en prominencia en 1980, cuando la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (UICN) presentó la Estrategia Mundial para la Conservación (WCS) con el objetivo general de lograr el desarrollo sostenible mediante la conservación de los recursos vivos. Pero la WCS estaba esencialmente del lado de la oferta, pues asumió al nivel y a la estructura de la demanda como unas variables independientes y autónomas e ignoró el hecho de que si se ha de perseguir un estilo sostenible de desarrollo, entonces tanto el nivel y, en particular la estructura de la demanda, tienen que ser modificados fundamentalmente (LÈLÈ, 1991). En resumen, la WCS realmente abordó únicamente la cuestión de la sostenibilidad ecológica en lugar del desarrollo sostenible o la sostenibilidad a secas.

La definición más popular vigente de desarrollo sostenible, es decir la que adoptó la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED) es muy breve (WCED, 1987): “El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.”

Afortunadamente la Comisión elaboró mucho más la cuestión operativa y afirmó que los objetivos fundamentales que se derivaban del concepto del desarrollo sostenible eran:

- Reactivar el crecimiento;
- Cambiar la calidad del crecimiento;
- Alcanzar las necesidades esenciales de empleo, alimentos, energía, agua y saneamiento;
- Garantizar un nivel sostenible de población;
- Conservar y aumentar la base de recursos;
- Reorientar la tecnología y gestionar riesgos;
- Fusionar medio ambiente y economía para la toma de decisiones; y
- Reorientar las relaciones económicas internacionales.

La mayoría de los individuos y organizaciones que promueven activamente el concepto de desarrollo sostenible se suscriben a algunos o a todos esos objetivos. Sin embargo, hay una nueva adición operativa: hacer el desarrollo más participativo. Así se completan nueve objetivos fundamentales que, desafortunadamente, no

disfrutan de tanta fama como la definición general.

Se distinguen cuatro tipos de participación: en la toma de decisiones, en la implementación, en la distribución de los beneficios y en la evaluación. La mayoría de la literatura sobre desarrollo sostenible no hace estas distinciones y la literatura principal sobre el tema asume e insiste superficialmente que la participación de las organizaciones no gubernamentales ONG locales en la ejecución de un proyecto de desarrollo sostenible asegurará su éxito. Se está pues frente a la ONGización del desarrollo sostenible (LÈLÈ, 1991). Nuevamente, desde el trabajo de Lèlè no parece haber cambiando mucho la situación.

Sin embargo (LÈLÈ, 1991), la formulación principal del desarrollo sostenible sigue teniendo importantes deficiencias en:

- Su caracterización de los problemas de la pobreza y de la degradación del ambiente;
- Su conceptualización de los objetivos de desarrollo, sostenibilidad y participación; y
- La estrategia que ha adoptado teniendo conocimiento incompleto e incertidumbre.

Dada esta confusión en términos, percepciones y conceptos, las políticas sugeridas por la principal corriente de pensamiento en desarrollo sostenible no pueden, y no se ajustan, a la idea básica de desarrollo ecológicamente racional y socialmente equitativo. Tienen muy a menudo graves deficiencias, y reflejan preferencias personales, organizacionales o políticas.

Por ejemplo (LÈLÈ, 1991), hay que lanzar advertencias en contra de la tendencia a creer que la equidad social garantiza automáticamente la sostenibilidad ambiental (y viceversa), o de quienes creen que se puede garantizar una verdadera base equitativa para el intercambio ignorando por completo una reestructuración del sistema monetario internacional.

Redclift (LÈLÈ, 1991) señala que aunque en el caso de la economía neoclásica las ganancias del libre comercio son superiores a las pérdidas, también:

- La propia teoría neoclásica reconoce que los beneficios del comercio pueden ser muy desigualmente distribuidos entre los países;
- En la práctica, puede haber perdedores, así como ganadores; y
- Si bien un comercio más libre logrará presumiblemente estimular el crecimiento económico, la afirmación de que el crecimiento económico es (socialmente) beneficiosa es cuestionable, por decir lo menos.

Norgaard (LÈLÈ, 1991) afirma que la teoría neoclásica del comercio asume que los factores de producción son móviles (que la mano de obra, el capital y la tierra se pueden alternar entre las líneas de producción, que la mano de obra se puede mover a nuevas ubicaciones), sin embargo, los servicios ambientales que le dan su valor a la tierra no pueden alternarse libremente de un producto a otro. Y esa es una seria restricción a cualquier proceso de desarrollo sostenible. Por otra parte (LÈLÈ, 1991), por ejemplo, la capacidad de un tipo de agricultura de proporcionar simultáneamente

rendimientos justos para el agricultor y el trabajador, y para satisfacer las necesidades de la población no agricultora de una manera ecológicamente racional no sólo depende de interacciones ecológicas, sino también de condiciones sociales complejas, condiciones que son incluso mucho menos bien entendidas hoy en día.

Los proponentes del desarrollo sostenible se enfrentan pues a potentes dilemas que afectan cualquier programa de acción política y de cambio social. Uno, el dilema entre la urgencia de tomar posiciones fuertes en cuanto a las preocupaciones fundamentales y a la necesidad de obtener amplia aceptación y apoyo político, es fundamental. Más concretamente, los defensores, analistas y practicantes del desarrollo sostenible necesitan (LÉLÉ, 1991):

- Rechazar claramente los intentos (y las tentaciones) de centrarse en el crecimiento económico como un medio de eliminación de la pobreza o de lograr sostenibilidad ecológica.
- Reconocer las contradicciones internas e insuficiencias en la teoría y en la práctica de la economía neoclásica, en particular en lo que se refiere al medio ambiente y a las cuestiones de distribución. En los análisis económicos, alejarse de arcanos modelos matemáticos para explorar las cuestiones empíricas como los límites a la sustitución de capital por recursos o los impactos de las distintas políticas de sostenibilidad en los distintos sistemas económicos.
- Aceptar la existencia de causas estructurales, estáticas, dinámicas, tecnológicas y culturales de la pobreza y la degradación del ambiente. Desarrollar metodologías para estimar la importancia relativa, y de las interacciones entre estas causas, en situaciones concretas. Explorar soluciones políticas, institucionales y educativas.
- Comprender las dimensiones múltiples de la sostenibilidad y tratar de desarrollar medidas, criterios y principios.
- Explorar qué patrones y niveles de demanda y utilización de recursos serían compatibles con las distintas formas o niveles de sostenibilidad ecológica y social, y con diferentes conceptos de equidad y justicia social.

En resumen, el desarrollo sostenible se puede considerar un súper pegamento que unirá a todos, desde el industrial con mentalidad de ganancias y el agricultor de subsistencia reductor de riesgo, hasta el trabajador social que busca la equidad, el primer mundista que se preocupa por la contaminación o es amante a la vida silvestre, el legislador maximizador del crecimiento, el burócrata orientado a metas, y por lo tanto, el político cuenta votos. Existe pues un peligro muy real de que la expresión desarrollo sostenible se convierta en un cliché sin sentido, a menos de que se haga un esfuerzo concertado para añadirle precisión y contenido a la discusión respondiendo primero a las preguntas:

- ¿Qué se va a sostener?
- ¿Para quién?
- ¿Por cuánto tiempo?

En cierto sentido, si el desarrollo sostenible existe para ser realmente sostenido como un paradigma de desarrollo (LÉLÉ, 1991), se requieren dos actividades

aparentemente divergentes: hacer que sea más preciso en sus fundamentos conceptuales, mientras que se permiten aproximaciones a estrategias de desarrollo más flexibles y diversas que podrían dar lugar a una sociedad que vive en armonía con el ambiente y consigo misma.

Es desde ese enfoque que este texto explora el panorama del modelado y de los modelos del desarrollo sostenible.

3 Modelado y Modelos

Los asuntos relacionados con los modelos y la dinámica de sistemas son muy recientes. Es difícil hallar referentes particulares más atrás de mediados del siglo XX aunque el aparato matemático para solucionar ese tipo de problemas existía desde inicios del siglo XIX, sólo se ha logrado cerrar el flujo de análisis y síntesis de la cadena sistema-idea-modelo-dinámica-simulación-sistema con la presencia y ayuda de herramientas muy poderosas de computación basadas en Tecnologías de Información y Comunicación (TIC).

En la elaboración de modelos de sistemas ecológicos y económicos (COSTANZA; GOTTLIEB, 1998), el propósito puede tener un rango que va desde el desarrollo de modelos conceptuales simples, con el fin de proporcionar un entendimiento general del comportamiento del sistema, hasta aplicaciones detalladas muy realistas encaminadas a la evaluación de propuestas políticas concretas.

No es apropiado pues juzgar toda esta gama de posibles modelos con los mismos criterios. Como mínimo (COSTANZA; GOTTLIEB, 1998), son necesarios tres:

- Realismo. Que el modelo pueda simular de una manera cualitativamente realista el comportamiento del sistema.
- Precisión. Que el modelo pueda simular el comportamiento del sistema de una manera cuantitativamente precisa.
- Generalidad. Que el modelo pueda representar una amplia gama de comportamientos del sistema.

Ningún modelo individual puede maximizar estos tres criterios y la selección de los objetivos a perseguir depende de los propósitos fundamentales que se definan (COSTANZA; et al., 1993).

Por otra parte, los científicos pueden verse obligados a modelar por una serie de razones que no se limitan a la creación del modelo per se. Desde la década de 1970 (COSTANZA; GOTTLIEB, 1998) se considera que los científicos usan los modelos para tres asuntos primordiales:

- La comprensión.
- La evaluación.
- La optimización.

Cuando no es posible realizar estudios de largo plazo o manipulaciones

experimentales, como ocurre a menudo con los SSEE, un modelo representativo puede ayudar a llenar los vacíos de conocimiento (COSTANZA; VOINOV, 2001). Los problemas que preocupan a los investigadores de las ciencias ecológicas y económicas son muy variados. Sin embargo, los modelos relativamente simples pueden proporcionar una gran cantidad de posibles respuestas a las preguntas ¿qué está pasando? o ¿qué pasa si...? Estos modelos (como todos los modelos) no deben ser considerados como respuestas definitivas a sus preguntas complejas asociadas, sino como síntesis de la información existente y guías o mapas para orientar el trabajo futuro, deben ser medios, no fines.

El modelado, sobre todo el global, es un gran avance en las ciencias sociales, y hay tres condiciones que lo han favorecido (BRUCKMANN, 2001):

- El ecologismo.
- La Teoría de Sistemas (en particular el método de dinámica de sistemas desarrollado por Jay Forrester en la década de 1950).
- El advenimiento de la computadora.

En 1968 Aurelio Peccei y varios de sus colegas fundaron el Club de Roma con el fin de estimular nuevas investigaciones de la problemática global desde una visión científica y completa. En retrospectiva, es difícil creer que cuando se fundó el Club de Roma, nadie tenía idea alguna de cómo se podrían hacer esas investigaciones (BRUCKMANN, 2001). La dinámica de sistemas fue uno de los caminos construidos para hacerlas.

4 La dinámica de sistemas

Paralelo al aumento del ecologismo, la dinámica de sistemas había surgido dentro de la teoría de sistemas como una nueva herramienta, aunque en ese momento su existencia sólo era conocida por un pequeño número de personas. Matemáticamente, la idea básica que subyace en la dinámica de sistemas es una aproximación de un sistema de ecuaciones diferenciales mediante un conjunto de ecuaciones en diferencias, cuyas propiedades teóricas habían sido elaboradas 150 años antes por Carl Friedrich Gauss (1777-1855). La contribución nueva de Jay Forrester fue, como en otros casos dentro de la dinámica científica, recoger un cuerpo de teoría matemática existente y aplicarlo a un campo nuevo (BRUCKMANN, 2001).

Al utilizar el método de ecuaciones en diferencias (BRUCKMANN, 2001), Forrester hizo de la dinámica de sistemas una herramienta que sólo requiere las cuatro operaciones aritméticas básicas, pero que permite modelar las relaciones más complejas, entrecruzadas y no lineales. En particular, permite modelar mecanismos de retroalimentación y bucles complejos de una manera curiosamente transparente y simple (aunque no simplista).

En el año 2007 se cumplieron 50 años de la aparición de la dinámica de sistemas

como, tal vez, la principal tecnología sistémica. Los sistemas son grupos de interacción, interdependientes entre sí mediante el intercambio de energía, materia e información. Los sistemas complejos se caracterizan por fuertes interacciones (por lo general no lineales) entre las partes, por ciclos complejos de retroalimentación que hacen difícil distinguir causa de efecto, y por retardos, discontinuidades, umbrales y límites considerables de espacio y tiempo. Estas características hacen que los científicos no estén habilitados para simples sumas o agregaciones de comportamientos de pequeña escala que produzcan resultados de gran escala (COSTANZA, 1993).

La Teoría General de Sistemas, un campo lógico matemático cuya tarea es la formulación y derivación de los principios generales que son aplicables a los sistemas en general (von BERTALANFFY, 1968), era la base para estudiar los sistemas, sobre todo los complejos, pero aunque estaba presente de los años 1940 en los entornos científicos, no alcanzaba para aportar, desde la práctica de las ciencias sociales y naturales, a la solución de los importantes y trágicos problemas de individuos y comunidades del planeta. Sólo faltaban algunos ingredientes.

Uno fue la computación, en particular la tecnología de la computación que permitió la aparición de máquinas de computación capaces de hacer y mostrar relaciones y resultados lógicos y matemáticos como nunca antes en la historia de la humanidad, pero sobre todo en unas nuevas escalas temporales desconocidas. Otro fue el desarrollo de los sistemas automáticos de control por realimentación del ingeniero pionero del Massachusetts Institute of Technology (MIT), Gordon S. Brown. Y el definitivo, el trabajo de Jay W. Forrester, también ingeniero del MIT.

Desde comienzos del decenio de 1980, las aplicaciones de la dinámica de sistemas se han extendido a un espectro muy amplio, incluidas las cadenas de suministro, la gestión de proyectos, los problemas educativos, los sistemas energéticos, el desarrollo sostenible, la política, la psicología, la medicina interna, la sanidad y muchas otras áreas. También se han hecho importantes avances metodológicos en las últimas dos décadas. Lo que sí marcó, y fue tal vez lo más importante de los ochentas, recae sobre la aparición de software avanzado de simulación con interfaces gráficas de usuario muy amigables y fáciles de usar (como por ejemplo Stella/iThink, Powersim o Vensim).

Si bien el modelado con dinámica de sistemas puede organizar la información descriptiva, conservar la riqueza de los procesos reales, basarse en el conocimiento de la experiencia y revelar la variedad de comportamientos dinámicos que se derivan de diferentes selecciones de normativas políticas, es el pensamiento sistémico el que puede señalar el camino y abrir las puertas de la dinámica de sistemas, advierte Forrester (2007). El peligro está en animar a la gente a creer que el pensamiento sistémico es y hace toda la historia.

El pensamiento sistémico es un sensibilizador que llama la atención sobre la existencia de los sistemas y algunas personas sienten que han aprendido mucho al sumergirse en él como aproximación a su análisis y síntesis. Pero tal vez sólo han

avanzado el 5 por ciento del camino hacia la comprensión de los sistemas. Forrester recuerda que el otro 95 por ciento reside en actividades relacionadas con la estructuración dinámica de sistemas de modelos y en las simulaciones basadas en esos modelos. Es sólo a partir de las simulaciones reales que se revelan las incoherencias de nuestros modelos mentales. El pensamiento sistémico puede ser un primer paso hacia una comprensión dinámica de los problemas complejos, pero está lejos de ser suficiente. Forrester termina haciendo esta reflexión: “[...] la ciencia y la tecnología ya no son las fronteras, han retrocedido al tejido de la actividad cotidiana, la próxima gran frontera explora un entendimiento mucho más profundo del comportamiento social y económico.”

¿De qué forma se debe trabajar en esa frontera? Aunque no existe un proceso universalmente aceptado para el desarrollo y uso de modelos de dinámica de sistemas, se sugieren algunas prácticas básicas que se utilizan comúnmente. Para RANDERS (1980) la mayoría de los modelos de dinámica de sistemas se crean en cuatro etapas como las que se enumeran a continuación, cada una con sus pasos esenciales:

1. Conceptualización
 - Definir el propósito del modelo.
 - Definir la frontera del modelo e identificar las variables clave.
 - Describir el comportamiento o dibujar los modos de referencia de las variables clave.
 - Dibujar los mecanismos básicos y los bucles de realimentación del sistema.
2. Formulación
 - Convertir los dibujos de realimentación en ecuaciones de nivel y rata.
 - Estimar y seleccionar los valores de los parámetros.
3. Pruebas
 - Simular el modelo y poner a prueba la hipótesis dinámica (ver abajo).
 - Probar los supuestos del modelo.
 - Probar el comportamiento y la sensibilidad a perturbaciones del modelo.
4. Aplicación
 - Probar la respuesta del modelo a diferentes políticas.
 - Trasladar las ideas estudiadas a formas accesibles.

5 Panorama de modelos

El estado y la evolución de los modelos se puede analizar desde lo que se denomina las generaciones de desarrollo. Para Adelman (1981), y con base en el modelado de las dinámicas de población, este es el recorrido:

- La primera generación de modelos hizo hincapié en la ecología de la población y tendía a ser matemáticamente avanzada, pero económica y tecnológicamente ingenua.
- La segunda generación de modelos se centró en la interacción entre el

desarrollo económico y el crecimiento de la población. Esta generación permitió plantear que en una perspectiva de 30 años las variables económicas son muy insensibles a variaciones relativamente grandes en la fertilidad y que es muy importante tener en cuenta los desplazamientos de la población para perspectivas de mediano plazo.

- La tercera generación surgió de hallazgos de la segunda como que el cambio demográfico es cuantitativamente pequeño y que hay interés en analizar la calidad de la población. Así se desarrollaron modelos enfocados en las necesidades básicas como aproximación al desarrollo. Esta generación de modelos permitió tener un marco de referencia general para hacer planeación basada en individuos humanos, incluyendo su nutrición, vivienda y educación.

Para terminar este brevísimo recuento del modelado, los modelos y la dinámica de sistemas, en la Tabla 1 se hace una línea de tiempo de los modelos que se han construido, así como de quienes los han liderado y en qué grupos, instituciones o empresas se han logrado llevar a cabo.

Tabla 1. Línea de tiempo de modelos.

(BOUMANS, 2002; BRETKE, 1993, 2008; BRUCKMANN, 2001; BRUTON, 1995; CASTELLAR; ESCRIBANO, 2002; COLE, 1974; RICHARDSON, 1982)

Año	Modelo	Líderes	Grupos
< 1960	Econométricos		
1968	Proyecto LINK	Lawrence Klein	Wharton Econometric Forecasting Associates WEFA (ahora Global Insight) ONU
1970	On the Future Japan & the World	Y. Kaya	MITI Japan Club de Roma
1970	World 1	Jay Forrester	MIT
1971	World 2	Jay Forrester Aurelio Peccei Eduard Pestel	MIT Club de Roma Stiftung Volkswagen
1972	World 3	Donella Meadows Dennis Meadows J. Randers	MIT Club de Roma
1973	World 3/91	Donella Meadows Dennis Meadows	MIT Club de Roma
1974	WIM World Interdependence Model	Mihalo Mesarovic Eduard Pestel	Case Western University Technical University Club de Roma
1971	STAFF Social & Technological Alternatives for the Future	C. Freeman	Science Policy Research Unit (SPRU) University of Sussex, UK Social Science Research Council SSRC
1974	LAWM Latin American World Model	Amilcar Herrera	Fundación Bariloche Club de Roma
1974	SARUM Systems Analysis Research Unit Model	Peter Roberts	OECD
1974	SOS State Of the System	E. R. Williams P. W. House	Washington Environmental Research Center Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency
1975	Two-Worlds	W. Cummings	MIT
1975	MOIRA Model of International Relations in Agriculture	Hanes Linnemann	Free University Club de Roma
1975	SAHEL	C. Piccardi	MIT

Año	Modelo	Líderes	Grupos
	(Región de Sahel - Africa Occidental)		
1975	RW-III Regional World-III	Frederick O. Kile Arnold Rabehl	Aid Association for Lutherans
1975	IWM Integrated World Model conocido también como RW-IV Regional World IV	Frederick O. Kile Arnold Rabehl	Aid Association for Lutherans
1972	FUGI Future of Global Interdependence	Akira Onishi Yoichi Kaya Yutaka Suzuki	Soka University Institute for Systems Science (SUISS)
1975	GEWS Global Early Warning System	Akira Onishi	Institute of Applied Economic Research Soka University MITI Japan Japanese Economic Planning Agency (EPA)
1977	WIOM World Input-Output Model	Wassily Leontiev	New York University Brandeis University
1977	SIM/GDP System of Integrated Models/ Global Development Processes	Sergei V. Dubovski Dzhherman M. Gvishiani Viktor A. Gelovani	Institute for Systems Analysis VNIISI Academia Soviética de Ciencias de Moscú
1980	Global2000	Gerald Barney	Institute for 21st Century Studies Carter Administration (USA)
1982	IFS International Futures Simulation	Barry Hughes Thomas Shook	Universidad de Denver International Futures
1983	Daisyworld	James Lovelock Andrew Watson	International Meteorological Institute.
1986	IEA/ORAU Long-Term Global Energy CO2 Model (A84PC)	J.A. Edmonds J.M. Reilly	Center for Global Environmental Studies CO2 Information Analysis Center
1987	GLOBUS Generating Long-term Options By Using Simulation	Stuart Bremer Karl Deutsch	Department of Political Science Binghamton University Science Center Berlin for Social Research
1990	World 4	W. Cummings	MIT
1990	IFs90 International Futures Simulation	Barry Hughes	Graduate School of International Studies University of Denver
1990	RMSM-X Revised Minimum Standard Model Extended	Thilak Ranaweera	Development Data Group World Bank,
1990	DNE21 Dynamic New Earth 21	Kenji Yamaji	Department of Electrical Engineering School of Engineering The University of Tokyo
1993	Towards a Fossil Free Energy Future	Michael Lazarus	Tellus Institute
1994	IMAGE Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect	Joseph Alcamo	Center for Environmental Systems Research Darmstadt University of Technology
1994-	Threshold 21	Weishuang Qu Gerald O. Barney Douglas Symalla Leslie Martin	Millennium Institute
1997	WEP World Energy Projection	Mary J. Hutzler Arthur T. Andersen	Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy
2001	The 3E COMPASS Economy-Energy-Environment Comprehensive Model for Policy Assessment	Kimio Uno	Keio University
2001-	GUMBO Global Unified Metamodel of the Biosphere	Roelof Boumans	Ecoinformatics Collaboratory Gund Institute for Ecological Economics University of Vermont

Finalmente se hará una reseña particular del modelado con dinámica de sistemas llevado a cabo en el Centro de Estudios en Economía Sistémica (ECSIM). Se trata

de un centro de investigación colombiano preocupado por el bienestar de la sociedad. Entre sus trabajos, cabe resaltar los que ha realizado para el Municipio de Medellín, el Área Metropolitana y el Departamento de Antioquia, todos en Colombia, y en donde la utilización de herramientas de modelado y simulación con dinámica de sistemas ha permitido representar las diferentes estructuras socio económicas y de consumo de recursos de las familias, y su comportamiento frente a mejoras en su nivel de ingresos, producto de políticas de inversión social. Así, se ha logrado establecer un conjunto de referentes para tratar, entre otros, el tema de pobreza en la ciudad de Medellín. El trabajo actual de ECSIM se orienta a involucrar en sus modelos el tema de sostenibilidad explícitamente, propiciando una oportunidad como punto de partida para la evaluación de políticas públicas por medio de simulación bajo criterios de sostenibilidad social, ecológica y económica.

ECSIM viene desarrollando desde hace más de 10 años dos familias de modelos, a saber:

- El Modelo de la Economía Nacional, que se considera de tercera generación, se ha estado construyendo desde 1995 utilizando la herramienta para dinámica de sistemas iThink y se encuentra como creación intelectual registrada. En la actualidad lo utilizan varias empresas públicas y privadas Colombianas y está formado por los siguientes módulos: Sector Real (Generador de Bienestar), 15 sectores económicos, Economía Monetaria (5 agentes: Bienestar, Gobierno, Familia, Sistema Monetario, Caja Externa), Matriz de Producción por sectores, Matrices Insumo-Producto, Población, Inversión, Consumo-Demanda, Estructura de Consumo (Patrones revelados de consumo mediante la Encuesta de Ingresos y Gastos con 10 deciles) y Familia.
- El Modelo Dinámico de Gestión Social, que también se considera de tercera generación, se viene construyendo desde 2001 con iThink y se ha utilizado tanto para Medellín, zona urbana, como para Antioquia, una de las siete subregiones Colombianas. En particular vale la pena destacar la capacidad de este modelo para analizar factores de expulsión o atracción de poblaciones.

Con base en esos dos modelos, ECSIM ha desarrollado (ECSIM 2006; 2006a; 2006b; 2006c; 2007) modelos especializados como:

- 2007. Micro mundo para la planeación de políticas de intervención social para aumentar el desarrollo humano y la esperanza de vida en los barrios de la ciudad de Medellín. Una aplicación de economía sistémica fundamentada en modelos de simulación de dinámica de sistemas.
- 2006. Construcción de referentes de futuro a 2020, visión y plan de mediano y largo plazo. Una aplicación de economía sistémica fundamentada en modelos de simulación de dinámica de sistemas.
- 2006. Modelo de planeación y simulación económica para la gestión social del desarrollo en el departamento de Antioquia, fundamentado en la dinámica de sistemas.
- 2006. Modelo de planeación y simulación económica para la gestión social del desarrollo en el municipio de Medellín, fundamentado en la dinámica de

- sistemas.
- 2006. Modelo de planeación y simulación económica para la gestión social del desarrollo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, fundamentado en la dinámica de sistemas.

6 Conclusiones

Aunque el modelado con dinámica de sistemas es relativamente reciente, existe una historia que necesariamente debe ser considerada por estudiosos, investigadores y practicantes que quieran enfrentar la gestión de la innovación tecnológica como fundamento para el desarrollo sostenible, de manera que no se repitan esfuerzos o se recorran caminos ya transitados por otros investigadores.

Existe un vacío en la literatura científica que proporcione una visión panorámica a lo largo del tiempo del modelado con dinámica de sistemas como herramienta para enfrentar los problemas de innovación para el desarrollo sostenible.

Para los problemas que preocupan a los investigadores de las ciencias sociales, ecológicas y económicas, los modelos y el modelado con dinámica de sistemas pueden proporcionar nuevas respuestas a las preguntas ¿qué está pasando? o ¿qué pasa si...? o, incluso, responder a nuevas preguntas no planteadas, fortaleciendo en análisis y la síntesis de la información existente y sirviendo de guías o mapas para orientar el trabajo futuro.

Se ha bajado la guardia en cuando al modelado. Se nota una sensible disminución en la proliferación de modelos de nueva generación tanto en la década de 1990 como en la primera del siglo XXI. Es necesario tener un observatorio de modelado con dinámica de sistemas que permita a la comunidad académica compartir avances.

Existe una infraestructura tecnológica, en particular de TIC, que soporta adecuadamente la parte técnica de la dinámica de sistemas. Sin embargo parece que no existe una transformación adecuada de conocimientos y que la práctica del modelado con dinámica de sistemas no ha llegado a las grandes corrientes del quehacer universitario.

Estamos en la era de la oportunidad de la dinámica de sistemas, hay herramientas, hay medios, hay procesos y los datos abundan. Parece que será necesario innovar de manera revolucionaria para cambiar las capacidades de conocimiento para modelar integrando transdisciplinariamente la aproximación a los SSEE, pero primordialmente, será necesario aclarar cuáles son los fines que se quieren alcanzar si el desarrollo ha de ser sostenible.

Bibliografía

- ADELMAN I. Some thoughts on third-generation economic-demographic models. **Population Studies**. New York: n. 73, 1981.
- BOUMANS, R. [et al.]. Modeling the Dynamics of the Integrated Earth System and the Value of Global Ecosystem Services using the GUMBO Model. **Ecological Economics**, v. 41, n. 3, p. 529-560, 2002.
- BRECKE P. Integrated Global Models that Run on Personal Computers. **Simulation**, v. 60, n. 2, p. 140-144, febrero 1993.
- BRECKE P. **Global Models**. Disponible en: <http://www.inta.gatech.edu/peter/globmod.html>, Consulta: abril 2008.
- BRUCKMANN, G. Global Modeling. **Futures**, v. 33, n. 1. p. 13-20, 2001.
- BRUTON A. **Global Energy Network Institute (GENI) Global Model Index**. Disponible en: <http://www.geni.org/globalenergy/library/geni/globalmodelindex.shtml>, Consulta: abril 2008.
- CASTELLAR V.; ESCRIBANO A. **Historia de los Modelos Globales**. Disponible en: <http://www.redcientifica.com/doc/doc200111240003.html>, Consulta: abril 2008.
- CENTRO DE ESTUDIOS EN ECONOMÍA SISTÉMICA (ECSIM). **Construcción de referentes de futuro a 2020, visión y plan de mediano y largo plazo. Una aplicación de economía sistémica fundamentada en modelos de simulación de dinámica de sistemas**. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2006.
- CENTRO DE ESTUDIOS EN ECONOMÍA SISTÉMICA (ECSIM). **Modelo de planeación y simulación económica para la gestión social del desarrollo en el departamento de Antioquia, fundamentado en la dinámica de sistemas**. Medellín: Dirección Administrativa de Planeación, Gobernación de Antioquia, 2006a.
- CENTRO DE ESTUDIOS EN ECONOMÍA SISTÉMICA (ECSIM). **Modelo de planeación y simulación económica para la gestión social del desarrollo en el municipio de Medellín, fundamentado en la dinámica de sistemas**. Medellín, Dirección Administrativa de Planeación, Municipio de Medellín, 2006b.
- CENTRO DE ESTUDIOS EN ECONOMÍA SISTÉMICA (ECSIM). **Modelo de planeación y simulación económica para la gestión social del desarrollo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá fundamentado en la dinámica de sistemas**. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2006c.
- CENTRO DE ESTUDIOS EN ECONOMÍA SISTÉMICA (ECSIM). **Micromundo para la planeación de políticas de intervención social para aumentar el desarrollo humano y la esperanza de vida en los barrios de la ciudad de Medellín. Una aplicación de economía sistémica fundamentada en modelos de simulación de dinámica de sistemas**. Medellín: Departamento Administrativo de Planeación, Municipio de Medellín, 2007.
- COLE, S. World Models, their Progress and Applicability. **Futures**, v. 6, n. 3. p. 201-218, 1974.
- COSTANZA, R. [et al.]. Modelling complex ecological economic systems: toward an evolutionary, dynamic understanding of people and nature. **BioScience**, n. 43, p. 545-555, 1993.
- COSTANZA, R.; GOTTLIEB, S. Modelling Ecological and Economic Systems with STELLA: Part II. **Ecological Modelling**, v. 112, n. 2-3. p. 81-84, 1998.
- COSTANZA, R.; VOINOV, A. Modeling Ecological and Economic Systems with STELLA: Part III. **Ecological Modelling**, v. 143, n. 1-2. p. 1-7, 2001.
- FORRESTER, J. System Dynamics - a personal view of the first fifty years. **System Dynamics Review**, v. 23, n. 2-3, p. 345-358, 2007.

LÉLÉ, S. Sustainable Development: A Critical Review. **World Development**, v. 19, n. 6. p. 607-621, 1991.

RANDERS, J. Guidelines for Model Conceptualization. En: **Elements of the System Dynamics Method**. Cambridge, MA: MIT Press, 1980, p. 117-138.

RICHARDSON, J. A Decade of Global Modelling. **Futures**, v. 14, n. 2. p. 136-145, 1982.

von BERTALANFFY, L. **General system theory; foundations, development, applications**. New York: G. Braziller, 1968.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **Our Common Future**. New York: Oxford. University Press, 1987.