

CAMBIO TECNOLÓGICO Y MODELOS DE SIMULACIÓN CON DINÁMICA DE SISTEMAS*

José Carlos Rodríguez**

Mario Gómez***

Resumen

Este trabajo analiza el uso de la dinámica de sistemas como un método de análisis en economía y ciencias de la gestión. Asume que estos fenómenos pueden ser entendidos como sistemas no lineales y complejos. Se describen las etapas que tienen que ser cubiertas para desarrollar un modelo bajo este enfoque. Particularmente, en este trabajo, el caso del cambio tecnológico y el desarrollo de los procesos de innovación ejemplifican el uso de este enfoque en economía y ciencias de la gestión. Finalmente, se revisan brevemente algunos trabajos en relación a este tema, destacándose los rasgos más importantes que caracterizan a estos trabajos en relación a la literatura sobre cambio tecnológico y desarrollo de innovaciones.

Palabras clave: cambio tecnológico; dinámica de sistemas; sistemas complejos; modelos de simulación.

Abstract

This paper analyzes the use of systems dynamics methods in economics and management sciences. It is assumed in this paper that these phenomena can be understood as non-linear and complex systems. The steps needed to develop a system dynamics model are analyzed. Particularly, in this paper, the case of technology change and the development of innovation processes exemplify the use of this approach in economics and management sciences. Finally, the paper briefly reviews some works in relation to these issues, highlighting the most important features that characterize these analyses in the literature on technology change and innovation developments.

Keywords: technology change; system dynamics; complex systems; simulation models.

Clasificación JEL: C63; B41; O33.

* El artículo fue recibido el 16 de septiembre y aceptado el 18 de diciembre de 2016.

** Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. jcrodriguez@umich.mx

*** Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

1. Introducción

En economía y ciencias de la gestión, el uso de la dinámica de sistemas se ha convertido en un enfoque metodológico adecuado para estudiar la estructura y el comportamiento de los sistemas complejos, ya que de acuerdo a este enfoque se entiende que muchos de los fenómenos que estudian estas disciplinas están determinados por múltiples variables e interconexiones (Sterman, 2000). De esta forma, también se puede decir que la dinámica de sistemas es un método de investigación que permite la comprensión de los sistemas dinámicos (Sterman, 2000). Particularmente, el enfoque metodológico de la dinámica de sistemas se ha aplicado al análisis de múltiples problemas en la administración, las organizaciones, así como en algunas otras áreas de la economía y las ciencias sociales (Forrester, 1994).

De esta forma, los métodos que se derivan de la dinámica de sistemas se enfocan al análisis del comportamiento de los sistemas, el comportamiento del ser humano, los sistemas físicos y técnicos, la psicología cognitiva y social, la economía, entre otros. Adicionalmente, también se puede decir que en economía y ciencias de la gestión los métodos de la dinámica de sistemas permiten conocer la dinámica de los sistemas complejos y no lineales que están conformados por un conjunto de circuitos de retroalimentación (Roberts, 1978).

Por otro lado, en los estudios relacionados a la gestión de la tecnología y los procesos de innovación, la dinámica de sistemas es un método utilizado para analizar cómo se generan tales procesos en el sentido de que estos fenómenos se caracterizan por ser procesos dinámicos y complejos que evolucionan constantemente en el tiempo. De esta forma, Maier (1998) proporciona un ejemplo de cómo la dinámica de sistemas puede ser utilizado como un enfoque metodológico apropiado para estudiar los problemas relacionados con la difusión del cambio tecnológico y de los procesos de innovación, haciendo hincapié en la idea de que estos procesos son un fenómeno complejo influenciado por un gran número de variables, tales como el precio, la publicidad, las características del producto que satisface una necesidad y así sucesivamente.

De esta forma, este trabajo hace una revisión de la literatura en torno a los procesos de cambio tecnológico e innovación desde la perspectiva de la dinámica de sistemas. Además de esta introducción, este trabajo se conforma de tres secciones. La sección 2 presenta una visión general de cómo los fenómenos sociales pueden ser modelados a partir de los métodos que se derivan de la dinámica de sistemas. La sección 3 se enfoca al estudio de las relaciones que se establecen entre cambio tecnológico e innovación. Finalmente, la sección 4 presenta algunas conclusiones.

2. Modelado y Dinámica de Sistemas

Desde una perspectiva general, se puede decir que los métodos estadísticos inferenciales tradicionalmente han estado en el centro de los análisis relacionados con la prueba de hipótesis en las ciencias sociales. Sin embargo, algunos autores señalado la importancia del modelado y la simulación como formas importantes de generar nuevos conocimientos en economía y ciencias de la gestión (Davis *et al.*, 2007; McCarthy *et al.*, 2010; Schwaninger y Gros-ser, 2008). Se podría decir entonces que la necesidad de generar nuevo conocimiento ha permitido la evolución de las técnicas de modelado en las ciencias sociales al hacer frente a diferentes problemas relacionados con cambios en las variables en el tiempo (Cloutier y Rowley, 2000). En este sentido, se podría decir que el análisis económico y de los negocios ha pasado por tres períodos que han caracterizado y determinado de manera muy precisa el desarrollo de las técnicas de modelado y simulación (Cloutier y Rowley, 2000). En este sentido, Cloutier y Rowley (2000) señalan que durante el primer período se observó un gran interés en el modelado de los ciclos económicos como una tarea importante en las agendas de los economistas. Durante este período, el proceso de construcción de modelos intentó incorporar las relaciones causales vinculadas a diferentes tipos de variables. En este mismo sentido, estos autores señalan que durante el segundo período en el desarrollo de las técnicas de modelado y simulación, los modelos no lineales fueron ampliamente estudiados y utilizados para explicar las propiedades dinámicas de los sistemas económicos. Por último, el tercer período se caracterizó por un amplio uso de *hardware* y *software* muy apropiados para realizar simulaciones en las ciencias sociales.

A pesar del gran esfuerzo realizado durante muchos años para llevar a cabo estas tareas Forrester (1975) ha señalado que el modelado y la simulación en economía y ciencias de la gestión, muchos de estos modelos empíricos no alcanzaron el objetivo de responder a las preguntas que se plantearon los investigadores sobre el comportamiento que se genera de manera conjunta entre las interacciones sociales, económicas y ambientales. De hecho, esta perspectiva del modelado ha hecho hincapié en la importancia que tiene la complejidad como un rasgo característico de las organizaciones sociales de hoy en día. De esta forma, la complejidad en las organizaciones a la que hace alusión Forrester (1975) significa que se podrían generar todo un conjunto de interacciones de retroalimentación con una amplia gama de efectos secundarios, concluyendo por lo tanto que los métodos experimentales tradicionales en las ciencias sociales no serían adecuados para realizar estos análisis ya que son menos flexibles. Es en este sentido que a través de la dinámica de sistemas, es posible conocer y caracterizar la estructura subyacente de los fenómenos sociales y por lo tanto su comportamiento y evolución en el tiempo. En la práctica, el enfoque sistémico que ofrece la dinámica de sistemas permite el uso simultáneo de información cuantitativa y cualitativa que nos permite conocer el comportamiento

de múltiples sistemas sociales y, de esta forma, poder conocer la naturaleza de las relaciones que se establecen entre las variables que los conforman. También es importante señalar que los modelos que se construyen haciendo uso de la dinámica de sistemas toman en cuenta una gama más amplia de fuentes de información, así como los modelos mentales que poseen los tomadores de decisiones, permitiendo así un mejor conocimiento sobre los sistemas que por naturaleza son cambiantes (Forrester, 1975, 1994).

En síntesis, se puede decir que la complejidad es por lo tanto un rasgo característico de los sistemas económicos y de negocios. Este hecho hace que la complejidad se convierta en un desafío importante para los investigadores que requieren de herramientas adecuadas para la investigación científica. En este sentido, la dinámica de sistemas es una respuesta a estas exigencias que impone la naturaleza compleja de los fenómenos sociales.

Los métodos que derivan de la dinámica de sistemas pueden verse como una vía que coadyuva a pensar acerca de la complejidad de los sistemas sociales y al mismo tiempo una explicación de los patrones de comportamiento que pueden entenderse a partir de la estructura que caracteriza a dichos sistemas (Forrester, 1975; Ford, 1999; Sterman, 2000). De esta forma, Sterman (2000) señala que los sistemas sociales y las organizaciones han estado cada vez más sujetos a cambios acelerados e inciertos. De esta forma, se puede entender que estructura, complejidad e incertidumbre son conceptos fuertemente relacionados entre sí en los modelos que se construyen a partir de los métodos que ofrece la dinámica de sistemas, pudiendo revelar por qué cambio estructural e incertidumbre son fuentes importantes que expliquen el comportamiento de los sistemas complejos (Sterman, 2000).

Dentro del enfoque de la dinámica de sistemas, los sistemas sociales son entonces tratados como entidades dinámicas y complejas. La complejidad significa que estos sistemas se encuentran en constante evolución y desequilibrio. Forrester (1975) y Sterman (2000) señalan que la complejidad es una consecuencia de la naturaleza dinámica de los sistemas que se caracterizan por ciertas rasgos como ser sistemas que se retroalimentan constantemente en el tiempo, ser no lineales, históricamente dependientes en el comportamiento de sí mismos, se auto-organizan y autorregulan, son adaptables, contra-intuitivos y resistentes a las políticas de cambio.

Por otro lado, se puede decir que los modelos que se derivan de la dinámica de sistemas se constituyen de cuatro elementos básicos (Forrester, 1975; Wolstenholme *et al.*, 1993):

1. Están conformados por múltiples circuitos de balance y retroalimentación
2. Su estructura se integra y se establece a partir de stocks y flujos de información
3. Algunas de sus variables muestran retardos en el tiempo
4. Son sistemas no lineales.

Desde esta perspectiva entonces se puede entender que los sistemas sociales se caracterizan por ser complejos, integrados por múltiples circuitos de retroalimentación y balance, y estar interconectados en todas sus variables (Forrester, 1994). De igual forma, los síntomas, las acciones y las soluciones que presentan estos sistemas complejos no son procesos aislados en donde las causas y efectos pueden confundirse entre sí, sino que más bien son procesos no lineales (Wolstenholme *et al.*, 1993). El modelo de oferta y demanda desarrollado por Whelan y Msefer (1996) es un ejemplo de cómo operan estos principios desde la perspectiva de la dinámica de sistemas. Justamente, a partir de este modelo, se puede entender por qué el proceso de equilibrio entre la oferta y la demanda se caracteriza por mostrar un mecanismo de ajuste muy distinto al que tradicionalmente se discute en la teoría económica, ya que de esta forma los inventarios pasan a ser en realidad una variable fundamental que permite obtener una solución de equilibrio. Si por ejemplo los inventarios son menores a un nivel deseado, la firma indirectamente elevará el nivel de suministro y con ello el precio a fin de aumentar la tasa de producción deseada.

De igual forma, Sterman (2000) hace hincapié en la importancia de los circuitos de retroalimentación en el proceso de modelado bajo la perspectiva de la dinámica de sistemas debido a que la diferencia principal entre la dinámica de sistemas y otras técnicas de modelado no se refiere precisamente a las causas en que se afectan las relaciones que se establecen entre las variables. Este principio es válido para todos los enfoques de modelado. Sin embargo, en la dinámica de sistemas se asume que las relaciones entre causa y efecto se establecen generalmente con cierto rezago en el tiempo y en el espacio, lo que hace que surjan algunos tipos de resistencia a las políticas que se implementan en el sistema y que es muy probable que los agentes económicos no sean sensibles a toda la gama posible de resultados que se pueden obtener (racionalidad limitada). De esta forma, Roberts (1978) hace hincapié en la filosofía subyacente en estos modelos y sugiere que los patrones de comportamiento en una organización son causados principalmente por la estructura que caracteriza a esa organización y por el hecho de que ésta debe ser entendida en términos de sus flujos de información y de los recursos que controla. En síntesis, Wolstenholme *et al.* (1993) sugiere que la estructura de cualquier organización se caracteriza por contener fuentes de amplificación, rezagos en el tiempo, información y diagramas de flujo.

Los circuitos a los que nos hemos estado refiriendo y que caracterizan a los modelos en dinámica de sistemas pueden ser de dos tipos (Sterman, 2000): circuitos de reforzamiento y circuitos de balance. De esta forma, la interacción de ambos tipos de circuitos determina la dinámica de cada sistema. Algunos estudiosos que hacen uso de la dinámica del sistema hacen hincapié en la idea de que en realidad cualquier proceso de aprendizaje es un proceso de retroalimentación que incluye todas las formas de información, tanto cuantitativas como cualitativas y que se determinan a partir de la dinámica del mismo sistema.

Ya en el modelado de los sistemas complejos, otros instrumentos importantes que ofrece la dinámica de sistemas se refiere a los niveles y tasas de cambio de las variables que conforman dichos sistemas. Técnicamente, la estructura de un sistema es un conjunto interconectado de niveles y tasas de cambio de las variables que lo integran y lo conforman (Sterman, 2000). De hecho, la dinámica de sistemas enfatiza que los procesos fundamentales que se pueden observar en un sistema se refieren a convertir y transformar los recursos entre los diferentes estados del sistema. Así, por ejemplo, las tasas de cambio de las variables que conforman un sistema representan la velocidad a la que se convierten estos recursos entre diferentes estados. Y de esta forma, el comportamiento de un sistema se determina utilizando un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden. Los procesos de innovación son un ejemplo claro de los principios metodológicos que caracterizan a la dinámica de sistemas. En efecto, un proceso de innovación es impredecible y se remodela constantemente en el tiempo para determinar la estructura del mercado (Sterman, 2000). Más aún, un proceso de innovación depende de muchas variables que se determinan e influyen de manera conjunta y al mismo tiempo como parte de estos procesos. Así, por ejemplo, un proceso de innovación se caracteriza por ser altamente complejo e incierto y de esta manera la forma fundamental en que las organizaciones son capaces de gestionar la complejidad y la incertidumbre es a través del conocimiento. Desde esta perspectiva, la dinámica de sistemas es útil para analizar el cambio tecnológico y la innovación y, en consecuencia, la información y el conocimiento se perfilan como la única manera de entender las decisiones que se toman al interior de un sistema (Sterman, 2000). En este sentido, la información que fluye dentro de un sistema se convierte en acciones que permiten una toma de decisiones más adecuada (Forrester, 1994). En este proceso, la creación de información sobre la estructura y la definición de la estrategia del sistema es necesaria para especificar el estado del sistema con el fin de tener un efecto ocasional de las tasas y las reglas que especifican este tipo de efectos (Wolstenholme et al., 1993).

Una vez que se han determinado las relaciones cualitativas a través de los circuitos de retroalimentación y balance, los flujos, los rezagos y las no linealidades, el proceso de simulación se convierte en la tarea más importante con el fin de probar cualquier hipótesis en los modelos que se construyen bajo el enfoque de la dinámica de sistemas. Un circuito causal o hipótesis dinámica se define como un lenguaje específico que representa de manera cualitativa las causas y los efectos que caracterizan la estructura de un sistema (Cloutier, 2002). De esta forma, el proceso de simulación pasa a convertirse en el núcleo del análisis en la dinámica de sistemas y es específico de este método de investigación (Wolstenholme et al., 1993; Forrester, 1994). Es importante mencionar que el proceso de simulación revela las relaciones subyacentes en el sistema. El diagrama o circuito causal provee la información relativa a los circuitos de reforzamiento y balance que retroalimentan el sistema y estructuran la forma que adquiere el sistema.

Existen cinco pasos en el proceso de modelado bajo el enfoque de la dinámica de sistemas (Sterman, 2000):

1. Definición y articulación del problema, incluyendo en esta etapa la selección y definición de las variables más importantes, así como el horizonte temporal de análisis.
2. Formulación de una hipótesis dinámica.
3. Formulación de un modelo de simulación que contiene la especificación, estimación y comprobación del modelo.
4. Proceso de prueba del modelo en conjunto con la comparación con otros modelos de referencia a fin de determinar la robustez en condiciones extremas, así como el análisis de sensibilidad.
5. Diseño de políticas y evaluación de los resultados junto con la simulación de escenarios.

Importante, al momento de señalar que los modelos de simulación son el objetivo central en el uso de los métodos que se derivan de la dinámica de sistemas, debemos entender que este principio es una forma de llevar a cabo la experimentación en dinámica de sistemas (Forrester, 1994). De hecho, Forrester (1994) y Sterman (2000) señalan que la simulación y la experimentación son el núcleo de los métodos de análisis de la dinámica de sistemas, teniendo en cuenta que estos modelos se caracterizan por: (i) ser altamente complejos, (ii) tener información limitada, (iii) racionalidad limitada, (iv) generación de resultados inesperados a partir de las medidas adoptadas, entre otros.

De este modo, la simulación mejora la capacidad de entender los resultados derivados de la toma de decisiones. Forrester (1994) hace hincapié en que la simulación en la dinámica de sistemas es un método adecuado para analizar las posibles alternativas en las organizaciones. Por su parte, Lyneis (1999) expresa la misma idea y sugiere que los modelos de la dinámica de sistemas pueden jugar un papel importante para entender los problemas, para determinar las consecuencias de trayectorias alternativas de múltiples acciones y para tener la capacidad de poner a prueba soluciones alternativas bajo diferentes escenarios.

Finalmente, otra característica de los métodos que se derivan de la dinámica de sistemas es la relación entre los modelos mentales de los tomadores de decisiones y la estructura misma de un sistema. A partir de la observación de cambios en los modelos mentales es posible modificar la estructura del sistema ya que existe la posibilidad de crear reglas de decisión alternativas. Estas reglas de decisión alternativas y las estrategias que emergen generan a su vez otros cambios en los modelos mentales de los tomadores de decisiones (Cloutier, 2002). A su vez, esta discusión se relaciona con el problema de la racionalidad limitada en economía y ciencias de la gestión (Simon, 1982). De esta forma, los modelos desarrollados bajo la óptica de la dinámica de siste-

mas se apoyan en la idea de que no existe entre los actores que conforman un sistema racionalidad perfecta. De hecho, se hace hincapié en que los sistemas son el resultado de múltiples circuitos, múltiples estados y el carácter no lineal que los caracteriza. Estas características implican desde luego la posibilidad de poder aprender y conocer estos procesos solamente desde una perspectiva limitada y, por lo tanto, también limitan la posibilidad del conocimiento del mundo real (Sterman, 2000).

3. Cambio Tecnológico y Dinámica de Sistemas

Con frecuencia los procesos de innovación y la difusión de nuevos productos en los mercados sigue un patrón de crecimiento conforme a los modelos logísticos en forma de "S". En la explicación de este patrón de comportamiento subyace la idea de que existe un circuito de retroalimentación o de refuerzo que genera de inicio un patrón de crecimiento exponencial. Sin embargo, en un momento posterior, cuando la difusión de las innovaciones ha alcanzado cierto nivel de saturación, el modelo logístico permite predecir cómo eventualmente se van imponiendo las características que se reflejan en un circuito de balance y que explican un límite al crecimiento en la tasa de difusión de las innovaciones. En este tipo de modelos, es posible decir que los circuitos de retroalimentación o de refuerzo permiten explicar el crecimiento de una variable, mientras que los circuitos de balance o equilibrio permiten explicar los límites en ese crecimiento. Particularmente, en el caso de los procesos de innovación, los circuitos de balance que utiliza la dinámica de sistemas son el resultado de la presencia de incertidumbre afectando a toda la estructura que caracteriza a estos mercados (Sterman, 2000). Algunos autores han demostrado cómo las organizaciones pueden hacer frente a la incertidumbre a través del aprendizaje y la gestión del conocimiento (Cloutier y Boehlje, 2002). Una situación incierta sugiere por lo tanto que el enfoque de la dinámica de sistemas puede ser un método adecuado para modelar el cambio tecnológico y la innovación, a través del concepto de incertidumbre que afecta el equilibrio constantemente en los mercados.

El cambio tecnológico es un proceso que se caracteriza por ser complejo y dinámico, generando comportamientos muy inciertos. En este sentido, el cambio tecnológico y los procesos de innovación contienen circuitos de refuerzo y de balance que retroalimentan y dan forma al surgimiento y tasa de adopción de nuevos productos por parte de los consumidores. Desde la perspectiva del enfoque de la dinámica de sistemas, el proceso de innovación-difusión de nuevos productos es análogo a un modelo epidemiológico, permitiendo obtener una explicación más completa y realista de cómo estos procesos innovación/difusión de nuevos productos se llevan a cabo en los mercados. La característica principal de este tipo de modelos es que deben tomar en cuenta el hecho de que en el inicio no existe ninguna explicación de por qué se

adopta un nuevo producto (Stermán, 2000). Un ejemplo de una explicación completa de este proceso de innovación/difusión es el modelo de Bass (Bass, 1969). Un supuesto importante en este modelo es que existe una probabilidad constante de que un individuo adopte un producto nuevo en el mercado en cada período como resultado de algunas influencias externas. Esta característica sugiere que cuando se introduce una innovación y la tasa de adopción de la población es cero, la única fuente de adopción sería la existencia de estas influencias externas, tales como la publicidad del producto (Stermán, 2000). En el plano de los mercados, la consecuencia más importante que se deriva de las características dinámicas de un proceso de innovación/difusión es que las formas de competencia cambian constantemente y, por lo tanto, la estructura de los mercados. Sin embargo, la dinámica de sistemas es un enfoque prometededor para entender el cambio tecnológico y los procesos de innovación desde la perspectiva de los modelos de difusión/adopción (Maier, 1998), ya que este enfoque enfatiza la existencia de múltiples circuitos de retroalimentación y balance que generan múltiples estados y no linealidades.

En este sentido, la complejidad dinámica y la información limitada son características fundamentales que reducen el potencial para el aprendizaje y la realización de un sistema, lo que limita la adquisición de conocimientos sobre el mundo real (Stermán, 2000).

El uso de mapas cognitivos simplifica enormemente entender la complejidad del mundo real, ya que nos da la posibilidad de inferir correctamente la dinámica de un sistema (Simon, 1982). En consecuencia, los métodos que se derivan de la dinámica de sistemas permiten tratar de forma muy diferente en relación a los métodos tradicionales a la complejidad, racionalidad limitada y percepción que caracterizan el cambio tecnológico. De esta forma, la dinámica de sistemas ofrece la posibilidad de aprender sobre el funcionamiento de los sistemas complejos, dando así la posibilidad de que las organizaciones desarrollen cierto tipo de acciones para alterar o modificar sus trayectorias en el tiempo (Forrester, 1994).

Por su parte, Janszen y Degenaars (1998) sugieren que el cambio tecnológico y los procesos de innovación son fenómenos complejos y que la dinámica de sistemas permite que sea más fácil entender la relación entre el cambio en los procesos de innovación y la competencia en los mercados como resultado de múltiples interacciones impulsadas por la existencia de circuitos de retroalimentación que refuerzan esos comportamientos. Estos principios son útiles para explicar cómo nuevas industrias y nuevos mercados emergen y se desarrollan constantemente en el tiempo.

En síntesis, la dinámica de sistemas puede apoyar al estudio de los procesos de innovación y el cambio tecnológico. De esta forma, autores como Cloutier y Boehlje (2002), Ford y Stermán (1998), Gómez y Rodríguez (2016), Janszen y Degenaars (1998), Maier (1998), Pardue *et al.* (1999), Rodríguez y Navarro-Chávez (2015) y Rodríguez *et al.*, (2014) son ejemplos claros de

cómo la dinámica de sistemas puede apoyar a la investigación de los procesos de innovación permitiendo que este enfoque revele una visión completa sobre la naturaleza de estos fenómenos.

De esta forma, Cloutier y Boehlje (2002) analizan la difusión de las innovaciones como un problema de los procesos complejos. Estos autores demuestran que las fases necesarias para desarrollar un nuevo producto (investigación y desarrollo, comercialización, etc.) implican necesariamente analizar las elecciones tecnológicas y la incertidumbre. Estos autores también establecen que desde el punto de vista micro, el problema fundamental es evaluar las capacidades de inversión de la empresa en investigación y desarrollo a fin de evaluar los beneficios esperados en condiciones de incertidumbre. Gómez y Rodríguez (2016) analizan la creación de spin-offs desde la perspectiva de los sistemas nacionales de innovación haciendo hincapié en las relaciones que se establecen entre los diferentes actores que contribuyen a desarrollar los procesos de transferencia de tecnología e innovación en las universidades, así como con su entorno. Janszen y Degenaars (1998) analizan la dinámica de los cambios en los procesos de innovación, desarrollo de nuevos productos y nuevos mercados. La idea central es que los productos y los mercados evolucionan de manera simultánea. Por otro lado, los cambios en las condiciones competitivas de los mercados y el desarrollo de nuevos productos son el resultado de cierto tipo de innovaciones apoyadas por políticas específicas provenientes de instituciones públicas y privadas. Maier (1998), por su parte, analiza el problema de cómo se genera la difusión de las innovaciones en el tiempo. También hace hincapié en que este es un problema dinámico y altamente incierto y que está influenciado por factores como el tiempo necesario para posicionarse en el mercado, los precios, la publicidad y la calidad de los productos. Este esquema permite investigar el proceso de la invención, la innovación y la imitación (o difusión) bajo la perspectiva del enfoque de la dinámica de sistemas y se argumenta que el uso de este enfoque permite desarrollar modelos más complejos para investigar estos procesos.

En resumen, este modelo permite evaluar la integración de las variables de retroalimentación de decisiones en los modelos de difusión para evaluar las estrategias de fijación de precios y formas de producción alternativas y, por lo tanto, las consecuencias alternativas de presupuestos para la investigación y desarrollo de nuevos productos. Pardue *et al.* (1999) analizan la rapidez y eficacia en la comercialización de los avances tecnológicos como características fundamentales para garantizar el éxito de las industrias de alta tecnología. Las principales características que se observan en este tipo de industrias son los rápidos cambios tecnológicos y su rápida obsolescencia. Una conclusión importante en ese trabajo es que la capacidad de reconocer el valor de los cambios tecnológicos, así como asimilar y explotar comercialmente esos cambios depende en gran medida de la inversión en investigación y desarrollo llevada a cabo por la firma. Utilizando el enfoque de la dinámica de sistema,

se pueden conocer los límites de otros enfoques para el análisis del proceso de innovación-difusión. Rodríguez y Navarro-Chávez (2015) desarrollan un modelo de un sistema regional de innovación con el fin de analizar las políticas de ciencia, tecnología e innovación en el caso de las economías emergentes. Este trabajo muestra las ecuaciones más importantes que caracterizan a este modelo, así como los resultados de las simulaciones que permiten evaluar políticas de ciencia, tecnología e innovación en escenarios alternativos. Finalmente, Rodríguez *at al.* (2014) modelan un sistema tecnológico de innovación para el caso de la biotecnología y las innovaciones en el caso de las economías emergentes. En este trabajo se señala la importancia de desarrollar a la misma tasa los mercados de capital riesgo y las capacidades gerenciales que den soporte a la creación de empresas de base biotecnológica en las economías emergentes a fin de garantizar una mayor tasa de éxito en estos mercados.

4. Conclusión

Este trabajo discute la importancia que pueden tener los métodos que se derivan de la dinámica de sistemas para el modelo en economía y ciencias de la gestión. Esta discusión se presenta de manera general para el caso del modelado en economía y ciencias de la gestión, y de manera particular para al caso de los fenómenos del cambio tecnológico y los procesos de innovación. Se entiende que estos procesos en economía y ciencias de la gestión son en realidad fenómenos no lineales y complejos. En el caso del cambio tecnológico, un enfoque como éste, nos permite entender que los procesos de innovación y de cambio tecnológico se pueden explicar como una relación de múltiples circuitos de retroalimentación y de balance que determinan la estructura de un sistema y su comportamiento en el tiempo.

Finalmente, se sugieren algunas referencias y se discuten brevemente algunos ejemplos del uso de la dinámica de sistemas en el estudio de estos fenómenos sobre el cambio tecnológico que se caracterizan por ser procesos no lineales y complejos. Vale la pena señalar que el proceso de simulación es un paso importante en el estudio de los fenómenos sociales a través de la dinámica de sistemas y que abre nuevas líneas de investigación para la realización de futuras investigaciones.

Referencias

- Bass, F. (1969). "A new product growth model for consumer durables". *Management Science*, 15, 215-227.
- Cloutier, L. M., & Rowley, R. (2000). "The Emergence of Simulation in Economic Theorizing and Challenges to Methodological Standards". *Documento de Trabajo*, Centre de Recherche en Gestion, Universite du Quebec a Montreal.

- Cloutier, L. M. (2002). "Notas de Curso". *Department of Management and Technology*, Université du Québec à Montréal.
- Cloutier, L. M., & Boehlje, M. D. (2002). Innovation management under uncertainty: a system dynamics model of R&D investments in biotechnology. En Morecroft, J. D. W., Sanchez, R., & Heene, A. (Eds.). *Systems Perspectives on Resources, Capabilities, and Management Processes*, Kidlington, Pergamon.
- Davis, J. P., Eisenhardt, K. M., & Bingham, C. B. (2007). "Developing theory through simulation methods". *Academy of Management Review*, 32, 480-499.
- Ford, D. N. (1999). "A behavioral approach to feedback loop dominance analysis". *System Dynamics Review*, 15, 3-36.
- Ford, D. N., & Sterman, J. D. (1998). "Dynamic modeling of product development processes". *System Dynamics Review*, 14, 31-68.
- Forrester, J. W. (1975). "A national model for understanding social and economic change". *Simulation* 24.
- Forrester, J. W. (1994). Policies, decisions, and information sources for modeling. En Morecroft, J. D. W., & Sterman, J. D. (Eds.). *Modeling for Learning Organizations*, Portland, Productivity Press.
- Gómez, M., & Rodríguez, J. C. (2016). "University spin-offs creation in Canada, Spain and Portugal: a comparative analysis from the perspective of the national systems of entrepreneurship". *International Journal of Globalisation and Small Business*, 8(4), 391-412.
- Janszen, F. H. A., & Degenars, G. H. (1998). "A dynamic analysis of the relations between the structure and the process of national systems of innovation using computer simulation: the case of the Dutch biotechnological sector". *Research Policy*, 27, 37-54.
- Lyneis, J. M. (1999). "System dynamics for business strategy: a phased approach". *System Dynamics Review*, 15, 37-70.
- Maier, F. H. (1998). "New product diffusion models in innovation management: a system dynamics perspective". *System Dynamics Review*, 14, 825-308.
- McCarthy, I. P., Lawrence, T. B., Wixted, B., & Gordon, B. R. (2010). "A multidimensional conceptualization of environmental velocity". *Academy of Management Review*, 35, 604-626.
- Pardue, J. H., Clark, T. D., & Winch, G. W. (1999). "Modeling short- and long-term dynamics in the commercialization of technical advances in IT producing industries". *System Dynamics Review*, 15, 97-105.
- Roberts, E. B. (Ed.) (1978). *Managerial Applications of System Dynamics*, Cambridge/London, MIT Press.
- Rodríguez, J. C., Navarro-Chávez, C. L., Gómez, M., & Mier, M. (2014). "Science, technology and innovation policy to sustain agricultural biotechnology in emerging economies: evidence from Mexico". *International Journal of Biotechnology*, 13(4), 198-229.

- Rodríguez, J. C., & Navarro-Chávez, C. L. (2015). "A system dynamics model of science, technology and innovation policy to sustain regional innovation systems in emerging economies". *International Journal of Innovation and Regional Development*, 6(1), 7-30.
- Schwaninger, M., & Grosser, S. (2008). "System dynamics as model-based theory building". *Systems Research and Behavioral Sciences*, 25, 447-465.
- Simon, H. (1982). *Models of Bounded Rationality*, Cambridge, MIT Press.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics*, Boston, McGraw-Hill/Irwin.
- Whelan, J., & Msefer, K. (1996). Economic Supply and Demand. *MIT System Dynamics in Education Project*, MIT.
- Wolstenholme, E. F., Henderson, S., & Gavine, A. (1993). *The Evolution of Management Information Systems: A Dynamic and Holistic Approach*, Toronto, Wiley.