



XII Seminario Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica - ALTEC 2007

Simulación de Sistemas de Innovación bajo un Enfoque de Dinámica de Sistemas

Robledo Velásquez, Jorge
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín - Colombia
jrobledo@unalmed.edu.co

Ceballos, Fernando
Universidad de Antioquia, Medellín - Colombia
fceball@unal.edu.co

Resumen: El presente trabajo busca contribuir al desarrollo de modelos de simulación de sistemas de innovación bajo el enfoque de Dinámica de Sistemas, como una metodología científica que permite integrar diversos componentes teóricos y explorar las causas estructurales del comportamiento de los fenómenos sociales complejos asociados a la innovación. El caso de estudio es un sistema local de innovación conformado por una comunidad rural en una zona no interconectada de un país en desarrollo, que se despliega para la introducción de tecnologías de generación de electricidad. El trabajo se llevó a cabo en el marco de un proyecto de investigación ejecutado conjuntamente por la Universidad Nacional de Colombia y el Imperial College de Londres, con la cofinanciación de Colciencias y la empresa de consultoría GUÍO Español.

El modelo desarrollado integra conceptos y proposiciones del marco de los Medios de Vida Sostenible y de la Gestión Tecnológica, buscando identificar aquellos componentes cuya interacción gobiernan la dinámica del microsistema de innovación; en particular, se explora la dinámica establecida entre los Capitales Social y Humano de la comunidad; las capacidades tecnológicas y de operación; los procesos de aprendizaje responsables de su acumulación; la presencia del Estado; y los procesos productivos de generación de energía eléctrica y de su transformación en bienes y servicios.

A partir del modelo se simulan tres posibles escenarios evolutivos del proceso de introducción de las nuevas tecnologías, según el nivel de capacidades que la comunidad logra acumular en

función de los distintos procesos de aprendizaje puestos en marcha: un escenario problema, un escenario de aprendizaje operativo, y un escenario de aprendizaje tecnológico.

Los resultados contribuyen a evidenciar el potencial de los modelos de simulación de sistemas de innovación bajo el enfoque de Dinámica de Sistemas, como una metodología científica que permite integrar distintas perspectivas teóricas complementarias para explorar los elementos y relaciones básicas que gobiernan la evolución del sistema.

1. Introducción: La importancia de Simular los Sistemas de Innovación

La innovación es, ante todo, un fenómeno social, originado en la interacción de actores diversos cuya dinámica es responsable de la producción y transformación del conocimiento científico y tecnológico en riqueza económica, bienestar social y desarrollo humano. Su importancia en la Sociedad del Conocimiento es tal, que a nivel de los sistemas de producción de bienes y servicios mercadeables ha sido considerada por el Consejo Estadounidense de Competitividad “*the single most important factor in determining America's success through the 21st century*” (American Council on Competitiveness, 2004, p. 5).

En la óptica del desarrollo de las naciones, la importancia de la innovación es incuestionable y debe ser tomada en cuenta como fenómeno central en la explicación de las dinámicas del desarrollo. Según Freeman (1995), la perspectiva neoclásica tradicional de la economía del desarrollo, fundada sobre la premisa de la tecnología como factor exógeno de producción, ha sido incapaz de explicar las diferencias de crecimiento entre países y entre regiones -la convergencia y divergencia del desarrollo nacional y regional. Por otro lado, desde la economía evolucionista, la explicación se ha abordado desde un enfoque sistémico que pone la innovación, siguiendo a Schumpeter, como motor del desarrollo económico. En este contexto, Freeman (1987) y Lundvall (1985, 1988) introdujeron la noción de Sistema Nacional de Innovación (SNI) (que tiene también dimensiones regionales y sectoriales) como concepto de alto poder explicativo de las dinámicas de desarrollo. La definición de Freeman hace énfasis en las interacciones institucionales, refiriéndose al SNI como una red de instituciones de los sectores público y privado, cuyas actividades e interacciones inician, importan, modifican y difunden nuevas tecnologías. Las propuestas de Lundvall desarrollan el concepto en su dimensión de aprendizaje colectivo, como un sistema social que tiene como actividad central el aprendizaje interactivo entre las personas y organizaciones.

A partir de los trabajos de Freeman y Lundvall, el concepto de sistema de innovación comenzó a ser desarrollado y explorado en sus posibilidades explicativas respecto a fenómenos complejos de industrialización y desarrollo, llevando, con frecuencia, a ser adoptado como concepto orientador de la formulación e implementación de políticas públicas (Sharif, 2006). En este sentido, el concepto ha demostrado tener un amplio potencial teórico y aplicado, lo que contribuye a explicar la abundante literatura que se ha generado sobre el tema. Sin embargo, en el marco de esta literatura centrada en la innovación, llama la atención la escasez de modelos de simulación que tengan como objeto los sistemas de innovación. El presente trabajo busca hacer una contribución al desarrollo de este tipo de modelos.

La escasez de modelos de simulación de sistemas de innovación no es sorprendente. Como fenómeno social, la innovación es extremadamente compleja. En general, la complejidad de los fenómenos sociales, a diferencia de los fenómenos físicos, hace que los modelos de simulación construidos para pronosticar su comportamiento sean muy poco confiables. Sin

embargo, como método de investigación científica, la simulación de fenómenos sociales ha demostrado ser bastante exitosa al revelar importantes relaciones y principios a partir de modelos relativamente simples (Axelrod, 1997).

Con el presente trabajo se busca desarrollar un modelo de simulación de un sistema local de innovación, que ayude a aprehender los elementos e interacciones que gobiernan la dinámica de una comunidad rural aislada enfrentada al desafío del desarrollo tecnológico para el logro de objetivos comunitarios. Metodológicamente, se trata de modelar una comunidad rural aislada como un microsistema socioeconómico de innovación y simular sus trayectorias de evolución bajo ciertas condiciones, utilizando la Dinámica de Sistemas como una herramienta que ha demostrado ser adecuada para representar este tipo de sistemas socioeconómicos complejos (Sterman, 2000).

Como componentes cuya interacción gobierna la dinámica del sistema de innovación a modelar se identifican: los capitales social y humano de la comunidad; las capacidades tecnológicas y de operación; los procesos de aprendizaje responsables de su acumulación; la presencia del Estado (a través de la inversión social directa y el subsidio a la inversión productiva); y los procesos productivos de generación de energía eléctrica, por una parte, y de su transformación en bienes y servicios, por otra.

2. Problemas de Acceso y Utilización de las Tecnologías Energéticas

El mundo actual es testigo de un desarrollo económico de profundas inequidades. Mientras que los países más ricos del hemisferio norte han crecido hasta alcanzar niveles de riqueza extraordinariamente altos, muchos otros países se estancaron en modelos económicos pre-industriales, dando como resultado una distribución desigual de la población y de la riqueza, con dramáticas consecuencias. Según la UNDP (2002), en el mundo existen 850 millones de adultos analfabetas (el 14% de población del mundo), 960 millones de personas sin acceso a fuentes de agua potable (el 16%) y 2 mil millones de personas sin el acceso a la energía eléctrica (el 33%). Esta situación es socialmente inaceptable y ambientalmente insostenible, constituyendo un enorme reto para todas las naciones del mundo.

Por otro lado, existe un amplio consenso en torno a que el desarrollo económico está ligado al desarrollo de la energía (ver, por ejemplo, Prasad & Villa, 2002; DFID, 2002), lo cual vincula la superación de las inequidades económicas a una mayor generación y consumo de energía. Las proyecciones indican que la demanda energética del mundo en el 2050 puede aumentar dramáticamente y gran parte de este incremento se dará en los países en vía de desarrollo (Prasad & Villa, 2002).

Ello explica por qué el problema del desarrollo de las comunidades rurales con dificultades energéticas y económicas ha sido tema de numerosos estudios a nivel mundial, tanto desde el punto de vista de la introducción de diversas tecnologías, como de programas orientados a la sustitución, uso y aprovechamiento de alternativas energéticas sostenibles. Una de tales iniciativas internacionales es el Programa Renewable Energy Technology and Sustainable Livelihoods –RESURL–, liderado por el Imperial College inglés, con la participación de investigadores de Cuba, Perú y Colombia, y el apoyo financiero del Department for International Development. Por Colombia participa la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

El presente trabajo da cuenta del componente de Gestión Tecnológica de un proyecto del Programa RESURL que fue financiando por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (Colciencias) y la empresa de consultoría GUÍO Español. Su objetivo era hacer una contribución de carácter teórico y metodológico al problema que plantea la introducción exitosa de tecnologías energéticas en comunidades rurales aisladas, explorando la utilidad del conocimiento y la experiencia que desde la Gestión Tecnológica se ha acumulado sobre el desarrollo y utilización de la tecnología con fines productivos.

Particularmente, era de interés profundizar en las posibilidades del concepto “capacidad” en el contexto de los microsistemas de innovación de las comunidades rurales aisladas. Los autores sugieren que este concepto es clave para entender los fenómenos que emergen cuando estas comunidades se enfrentan al desafío de introducir y explotar exitosamente una o varias tecnologías energéticas, buscando elevar sus niveles de riqueza económica, bienestar social y desarrollo humano.

3. Tecnología y Capacidades

Desde una concepción integral que supera las tradicionales visiones reduccionistas, la tecnología no se agota en la dimensión tangible del artefacto o la máquina; por el contrario, la tecnología es, ante todo, un fenómeno social y humano; en palabras de Pitt (2000, p. 11), *"technology is humanity at work"*. Es decir, la tecnología no se reduce a las máquinas, los equipos y las instalaciones físicas que sirven para transformar materias primas, insumos y componentes en bienes y servicios. La tecnología es también información, conocimiento, experiencia, habilidades y organización que, en conjunto con los elementos tangibles antes mencionados, conforman un cuerpo de capacidades dotadas de sentido al crear posibilidades de decisión y acción para el logro de objetivos socialmente reconocidos.

Desconocer las dimensiones social y humana de la tecnología es reducirla a un agregado de aparatos y estructuras físicas que rápidamente son ignorados o rechazados por la comunidad como un cuerpo extraño. Desafortunadamente, en los procesos de introducción de nuevas tecnologías, es común que la atención se concentre en sus elementos tangibles, ignorando las capacidades que dan cuenta de las posibilidades de una real apropiación social de las tecnologías y de su posterior mejoramiento y transformación.

El margen de decisión y las posibilidades de acción creadas por las capacidades es una característica de estas que las identifican como tales (Winter, 2000, p. 983). Sin capacidades, una organización social ve recortadas sus opciones de decisión y acción para el logro de sus objetivos. Por otra parte, como es bien sabido en contextos empresariales, la acumulación de capacidades no resulta de la acción de los mercados: *"[t]he term 'capability' emphasizes the key role of strategic management in appropriately adapting, integrating, and re-configuring internal and external organizational skills, resources, and functional competences toward changing environment"* (Teece & Pisano, 1994, p. 538). En las comunidades que nos ocupan, esto sugiere que la acumulación de capacidades no solo es una condición para el logro de determinados objetivos, sino que resulta de la actuación consciente y dirigida de la comunidad para poner en marcha el tipo de procesos mencionados por Teece & Pizano y que más adelante denominaremos procesos de aprendizaje.

No obstante que la naturaleza de las capacidades sigue siendo un tema debatido en la literatura especializada, es suficientemente claro que las capacidades están asociadas a las posibilidades

de la comunidad para abordar satisfactoriamente la solución de los problemas que surgen en el proceso de introducción y utilización de una nueva tecnología. En este sentido, la existencia de capacidades asegura la superación de los problemas que emergen en el proceso, dando como resultado la introducción exitosa de la tecnología. Al respecto, es necesario reconocer distintas posibilidades de “éxito” según el nivel de expectativas sobre el desempeño de la tecnología. Un nivel de desempeño podría referirse, por ejemplo, al establecido por las especificaciones técnicas del proveedor de la tecnología, para lo cual las capacidades requeridas podrían estar asociadas a funciones básicas de operación y mantenimiento; otro nivel podría referirse a la optimización del desempeño de la tecnología, desarrollando sus potencialidades más allá de la línea de referencia establecida por las condiciones normales de explotación. Obviamente, cada situación involucra un tipo distinto de capacidades que es necesario identificar.

Para abordar este asunto, se adopta aquí la aproximación sugerida por Bell (1984), en el sentido de diferenciar las capacidades operativas (aquellas que permiten mantener en operación una tecnología) de las capacidades tecnológicas (aquellas que permiten dominar y dirigir el cambio técnico). En consecuencia, es posible identificar distintos escenarios evolutivos del proceso de introducción de una nueva tecnología, según el nivel de capacidades que la comunidad logre acumular en función de los distintos procesos de aprendizaje tecnológico puestos en marcha, como se verá en la sección siguiente.

4. Aprendizaje y Desempeño Tecnológico

El aprendizaje puede considerarse como la forma a través de la cual las organizaciones y comunidades construyen y desarrollan capacidades; en este sentido, más allá de un aprendizaje elemental asociado automáticamente a la experiencia operativa, el cual agota rápidamente sus posibilidades de desarrollo organizacional (Bell, 1984), el aprendizaje requiere esfuerzos deliberados y un enfoque estratégico para responder a desafíos competitivos, tecnológicos y regulatorios del entorno (Dodgson, 1991a, pp. 135-136).

La importancia del aprendizaje y la insuficiencia de mecanismos de mercado para la acumulación de capacidades conducen a la pregunta por las fuentes del aprendizaje. A este respecto, la literatura reporta varios posibles canales identificados genéricamente como procesos *learning-by*, entre los cuales los más representativos son: el *learning-by-doing* (Arrow, 1962) o aprendizaje resultado de la experiencia productiva; el *learning-by-changing* (Bell, 1984) o aprendizaje resultado de la introducción de cambios experimentales y controlados a los procesos y productos; el *learning-by-using* (Rosenberg, 1982) o aprendizaje resultado de las aplicaciones que hacen los usuarios de un producto; el *learning-by-hiring* y *learning-by-training* o aprendizaje asociado a la contratación, vinculación, capacitación y entrenamiento de personal; el *learning-by-searching* y *learning-by-R&D* (Cohen & Levinthal, 1989) o aprendizaje que resulta de actividades de investigación y búsqueda sistemática de información; y el *learning-by-collaborating* (Dodgson, 1991b) o aprendizaje resultado de la colaboración entre personas y organizaciones.

Dependiendo de los procesos de aprendizaje puestos en marcha por la comunidad se podrían, entonces, alcanzar distintos niveles de capacidades para lograr los objetivos de desempeño asociados a una determinada tecnología. La Figura 1 muestra el efecto de tales procesos de aprendizaje. Básicamente, se identifican tres escenarios posibles: el escenario problema (L_1 - L_3), el escenario de aprendizaje operativo (L_1 - L_2) y el escenario de aprendizaje tecnológico,

que podría descomponerse en un escenario de mejoramiento continuo (L₁-L₄) y en un escenario de innovación (L₁-L₅). La línea L₀-L₀ corresponde al desempeño nominal de la tecnología según las especificaciones técnicas del proveedor. Normalmente, el desempeño inicial es algo inferior al nominal (L₁), pero la brecha se va cerrando a medida que la comunidad acumula capacidades mediante procesos de aprendizaje.

El escenario problema (L₁-L₃) se presenta cuando las capacidades de la comunidad no son suficientes para garantizar la operación sostenida de la tecnología energética, a pesar de la existencia de otras condiciones favorables. En la práctica, esta situación termina con el paro permanente de la tecnología por problemas insuperables de tipo operativo o de mantenimiento. Desafortunadamente, este escenario es frecuente, incluso en aquellos casos en que la tecnología ha sido bien seleccionada, la evaluación financiera arroja resultados positivos y las licencias ambientales son otorgadas al proyecto.

El escenario de aprendizaje operativo (L₁-L₂) se alcanza cuando la comunidad logra garantizar la operación sostenida de la solución energética durante su vida útil y genera valor agregado a partir de la energía producida. En este caso, los procesos de aprendizaje, principalmente del tipo *learning-by-doing*, elevan el desempeño inicial de la tecnología a niveles que se aproximan con el tiempo al valor de referencia.

El escenario de mejoramiento continuo (L₁-L₄) se presenta cuando se logran introducir mejoras incrementales a la tecnología de manera continua, lo cual implica poner en juego procesos de aprendizaje que van más allá del *learning-by-doing*, del tipo *learning-by-changing*, *learning-by-hiring* y *learning-by-training*. Como resultado de la aplicación de las capacidades acumuladas se obtiene, principalmente, un aumento en la eficiencia operativa de la planta y, por ende, una mayor generación de energía o un menor consumo de insumos, o ambos. También es posible lograr una mejor calidad en la provisión de energía y de otros servicios asociados.

El escenario de innovación (L₁-L₅) implica la introducción de novedades o mejoras significativas a los productos, procesos y métodos organizativos y de mercadeo relacionados con la generación de energía y su utilización productiva.

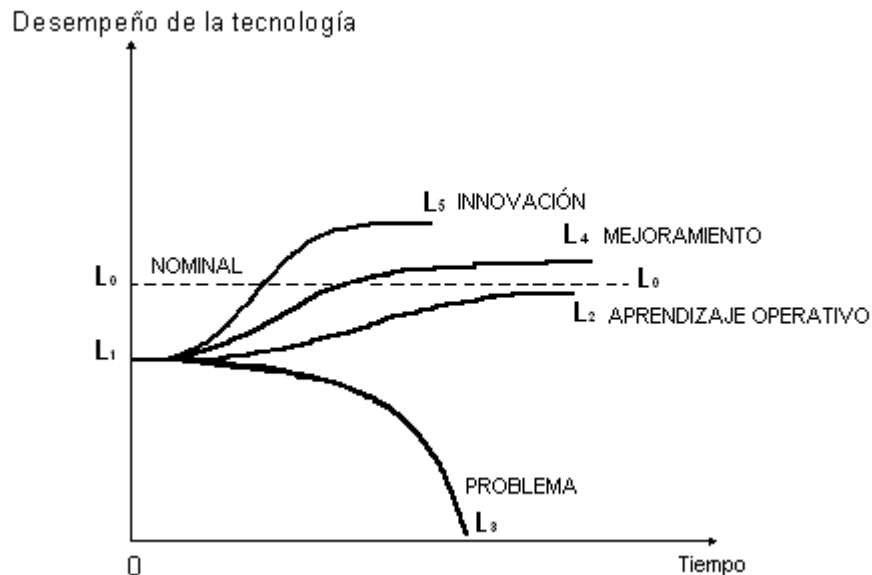


Figura 1. Escenarios de desempeño tecnológico como resultado de distintos procesos de aprendizaje.

5. Objetivos Comunitarios y Medios de Vida Sostenibles

La introducción de una tecnología en una comunidad no es en sí misma un objetivo. Si la comunidad no tiene claridad sobre el papel de la tecnología en el logro de objetivos comunitarios últimos (por ejemplo, satisfacción de necesidades básicas, mitigación de problemas medioambientales, mayor autonomía, etc.), la tecnología deja de ser percibida como una solución y es rápidamente abandonada. Solamente cuando hay una fuerte conexión entre la tecnología y el logro de objetivos comunitarios, adquieren sentido los esfuerzos deliberados que tiene que hacer la comunidad para poner en marcha y sostener los procesos de aprendizaje responsables del desempeño adecuado de la tecnología.

Se requiere, entonces, una forma general de representar los objetivos comunitarios y de medir su logro. Para el efecto, en el presente trabajo adoptamos el marco de los Medios de Vida Sostenibles, en cuya perspectiva los objetivos comunitarios pueden resumirse en alcanzar balances y niveles satisfactorios de un conjunto sostenible de activos, potencialidades y actividades de la comunidad que le sirven como medios de vida. Según el *Department for International Development* (DFID) del Reino Unido, el concepto de sostenibilidad hace referencia a la posibilidad de que los medios de vida soporten tensiones y choques y puedan recuperarse de los mismos, manteniendo y mejorando sus posibilidades hacia el futuro, sin dañar la base de recursos naturales existentes (DFID, 2003). En el marco conceptual desarrollado por el *Rural Livelihoods Advisory Committee*, se identifican cinco categorías de capitales que soportan los medios de vida, a saber: el Capital Natural, el Capital Físico, el Capital Financiero, el Capital Social y el Capital Humano (ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Composición de los capitales según el marco de los Medios de Vida Sostenible.

Capital Humano: Aptitudes, conocimientos, capacidades laborales o niveles de formación,

potencial de liderazgo y estatus sanitario, que en conjunto permiten a las poblaciones entablar distintas estrategias y alcanzar sus objetivos en materia de medios de vida.

Capital Natural: Son la base natural (bosques, recursos marinos/silvestres, agua, calidad del aire) con la que se obtienen todos o parte de los flujos de servicios útiles en materia de medios de vida (i.e. ganadería, pesca, recolección de madera, extracción mineral, etc.).

Capital Social: Recursos sociales en los que las comunidades se apoyan en la búsqueda de sus objetivos en materia de medios de vida. Facilitan la cooperación, reducen costos de transacción y proporcionan la base para crear confianza, reciprocidad e intercambio.

Capital Físico: Comprende la infraestructura y los medios de producción necesarios para que las poblaciones satisfagan sus necesidades básicas y sean más productivas (medios de transporte asequibles; alojamientos y edificios seguros; suministro de agua y saneamiento adecuados; energía limpia y asequible; y acceso a la información y a las comunicaciones).

Capital Financiero: Son los recursos financieros que las poblaciones utilizan para lograr sus objetivos en materia de medios de vida. Las fuentes principales son: las partidas disponibles o ahorros (dinero, depósitos bancarios o activos líquidos como el ganado o las joyas) o créditos, y las entradas regulares de dinero (pensiones u otros pagos realizados por el estado y remesas).

Fuente: DFID (2003).

6. Un Modelo de Dinámica de Sistemas para el Microsistema de Innovación

Para avanzar en la conexión teórica entre el marco de los Medios de Vida Sostenibles (que nos proporciona una herramienta versátil de planificación y gestión del desarrollo de las comunidades) y el marco teórico propuesto arriba desde la Gestión Tecnológica (basado en el mantenimiento, reconfiguración y creación de capacidades mediante procesos de aprendizaje para la introducción y utilización exitosa de tecnologías), sugerimos una relación básica entre capitales y capacidades, en el contexto de una comunidad rural donde son significativas las políticas públicas, la generación y el consumo de energía, y la producción de valor agregado en forma de bienes y servicios con significado para la comunidad. Para ello proponemos un modelo causal de tipo sistémico que se resume en la Figura 2, la cual presenta el diagrama causal del microsistema de innovación que modela la dinámica de introducción de una tecnología energética en una comunidad rural aislada¹.

¹ La construcción y explicación detallada del modelo escapa a las posibilidades del presente artículo; al respecto, ver Ceballos, Robledo & Aguilar (2005a; 2005b) y Robledo, Aguilar & Ceballos (2005).

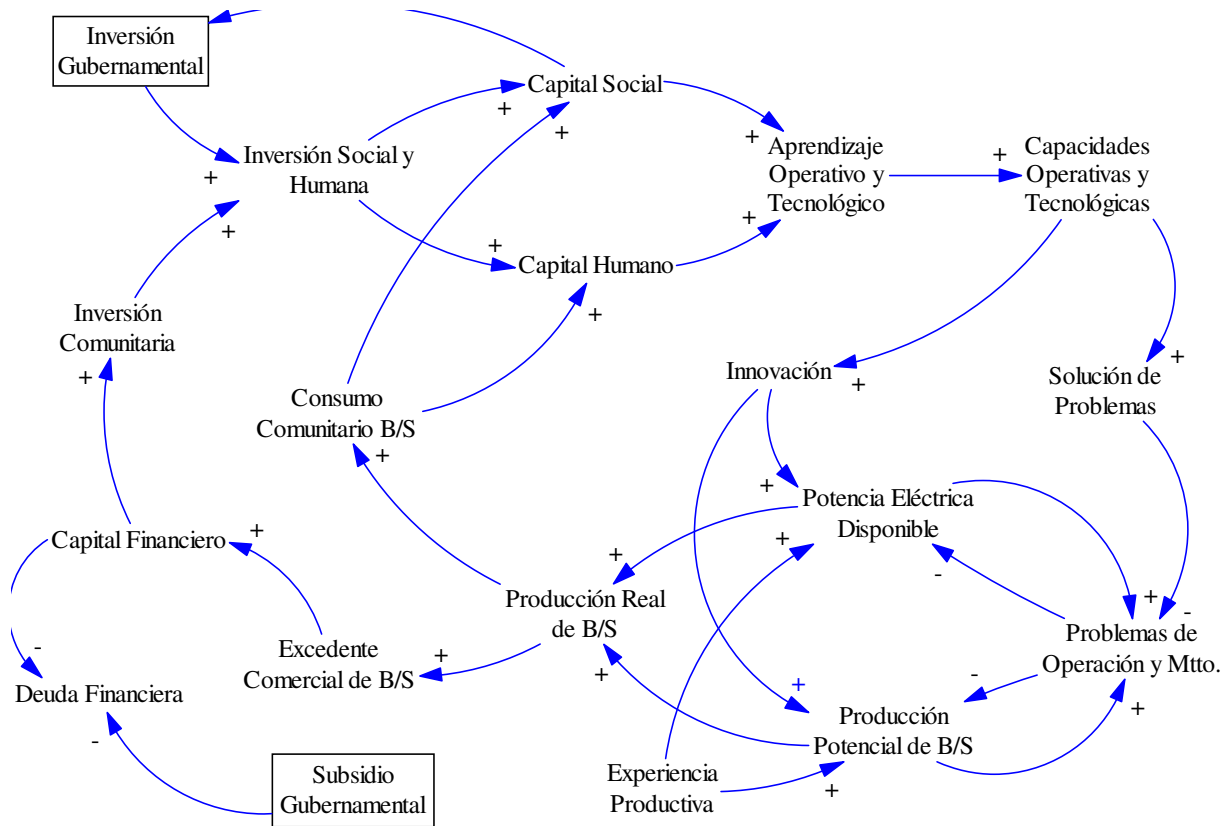


Figura 2. Diagrama causal simplificado del microsistema de innovación para la introducción de tecnologías energéticas.

7. Escenarios de Simulación del Modelo y Resultados

Con base en el diagrama causal de la Figura 2 se construye un modelo de flujos y niveles cuyas simulaciones se corren para un caso hipotético construido con base en la información del Cuadro 2. En la Figura 3 se presenta la evolución de las principales variables del modelo para los tres escenarios de simulación.

El tiempo de simulación es de cinco años, lapso suficiente para que se desarrolle completamente la fase de introducción de una tecnología energética en el microsistema de innovación considerado. Durante este tiempo se considera que las variaciones de población no son significativas (suponiendo índices de natalidad y mortalidad normales y ausencia de fenómenos extraordinarios de emigración o inmigración). Tampoco se consideran significativos otros efectos sobre la comunidad causados por factores políticos, económicos y sociales que nos estén asociados directamente a la introducción de las tecnologías energéticas y productivas consideradas en el modelo.

Cuadro 2. Parámetros de la comunidad para las simulaciones.

Número indicativo de habitantes	150 personas, 30 hogares
Potencia eléctrica instalada	50 KW
Capital Financiero inicial asociado a la tecnología eléctrica	\$0
Inversión inicial en Capital Físico asociado a la tecnología eléctrica	\$420.000.000
Financiamiento de la inversión inicial	120 meses, 0% interés
Subsidio Gubernamental a la inversión inicial en Capital Físico	50% de las cuotas de amortización
Inversión Social Gubernamental: Escenario Problema	\$300.000 diarios
Inversión Social Gubernamental: Escenario de Aprendizaje Operativo	\$870.000 diarios
Inversión Social Gubernamental: Escenario de Aprendizaje Tecnológico	\$1.000.000 diarios
Intensidad de valor agregado de la producción de B/S	25% del costo total
Costo de la energía eléctrica	\$150 KW-h
Factor de intensidad eléctrica	4
Factor de utilización de la potencia eléctrica disponible	0.6

7.1. Escenario Problema

El escenario problema se configura cuando las capacidades operativas y tecnológicas de la comunidad no son suficientes para asegurar la disponibilidad adecuada de potencia eléctrica y su transformación eficiente en B/S (línea azul en los gráficos de la Figura 3). En tal caso, la potencia eléctrica disponible comienza un proceso de degradación desde el momento en que la tecnología energética es puesta en operación, por causa de los problemas de operación y mantenimiento que surgen y no son debidamente solucionados. Como consecuencia, la producción de B/S no puede desarrollarse para alcanzar los niveles planificados, con efectos adversos sobre la inversión social y humana y los niveles de los respectivos capitales. A su vez, los niveles insuficientes de los Capitales Social y Humano inhiben los procesos de aprendizaje e impiden la acumulación de capacidades operativas y tecnológicas, cerrando un círculo vicioso que mantiene a la comunidad sumida en el subdesarrollo.

En este escenario, los Capitales Social y Humano tienen un valor inicial bajo, característico de comunidades rurales aisladas que no han sido beneficiarias de niveles adecuados y sostenidos de inversión gubernamental. En relación con las iniciativas de energización rural, el Estado normalmente participa mediante la provisión de subsidios a la inversión inicial, tanto en forma de aportes en especie como de recursos financieros directos. Sin embargo, este subsidio gubernamental sólo contribuye a aliviar la carga financiera de la comunidad sin que el problema de fondo sea resuelto, por cuanto sin fuentes energéticas no hay producción de B/S y, por tanto, de excedentes financieros para invertir en Capital Humano y Social.

7.2. Escenario de Aprendizaje Operativo

Este escenario se desarrolla cuando una inversión gubernamental adecuada y sostenida da lugar a niveles significativos de Capital Social y Humano, los cuales posibilitan la acumulación de capacidades operativas suficientes para asegurar la operación de las tecnologías energéticas y productivas, de manera que su desempeño alcance, con el tiempo, los niveles de referencia establecidos por los proveedores de las tecnologías (línea roja en los gráficos de la Figura 3). Dependiendo de la dificultad operativa de las tecnologías y las capacidades operativas acumuladas, el período de puesta a punto de los procesos productivos y comerciales conlleva una mayor o menor caída de la producción por períodos más o menos extendidos, durante los cuales es crítico mantener los procesos productivos en marcha. En este escenario, sin embargo, los niveles de Capital Social y Humano no son suficientes para propiciar la acumulación significativa de capacidades tecnológicas.

En este escenario, la producción sostenida de B/S se orienta, prioritariamente, a satisfacer las necesidades básicas de la comunidad. Los excedentes son utilizados comercialmente para contribuir a pagar la deuda generada por la inversión inicial y, eventualmente cuando los niveles de Capital Financiero sean suficientes, para contribuir a la formación de Capital Social y Humano. Sin embargo, esto último parece requerir de niveles de Capital Físico para producción de energía y de B/S mucho más elevados y una dinámica productiva y tecnológica superior; a los niveles establecidos para la simulación, el Capital Financiero oscila alrededor de cero, a causa de la destinación de los ingresos por comercialización de excedentes al pago de la deuda, sin que haya posibilidades de inversión comunitaria. En tales condiciones, un mayor subsidio gubernamental contribuye solamente a disminuir más rápidamente la deuda durante el tiempo de simulación.

7.3. Escenario de Aprendizaje Tecnológico

Este escenario presupone una acumulación significativa de capacidades operativas y tecnológicas, lo cual acelera el proceso de puesta a punto de los procesos productivos y comerciales y asegura el logro de niveles superiores de producción (línea verde en los gráficos de la Figura 3). Como componente de las capacidades tecnológicas, las capacidades de innovación son de difícil y lenta maduración y requieren de procesos de aprendizaje tecnológico relativamente prolongados; su efecto pleno se manifiesta en la forma de niveles superiores de producción relativos a los logrados en el escenario de aprendizaje operativo. Sin embargo, quizás su principal potencial estriba en las posibilidades de expansión futura de la producción (tanto de energía como de B/S), a partir de los mayores niveles de Capital Social y Humano logrados por una inversión gubernamental superior frente a la del escenario de Aprendizaje Operativo.

No obstante, tampoco en este escenario se logra una acumulación satisfactoria de Capital Financiero, posiblemente por la misma razón aducida arriba en relación con la insuficiente acumulación de Capital Físico y los bajos niveles de producción de energía y de B/S. El único efecto aparente es una leve aceleración posible del pago de la deuda que, sin embargo, no lograría ejercer un efecto significativo sobre la deuda debido a su magnitud, al menos durante el período de simulación.

8. Conclusiones y Trabajo Futuro

Aunque la noción de sistema de innovación se ha venido explorando teóricamente y aplicando de manera extensa desde finales de los 80, la simulación de los sistemas de innovación es un tema que todavía está por desarrollar. En el presente trabajo se ha abordado el tema desde el enfoque de Dinámica de Sistemas, buscando aportar al desarrollo de un modelo de simulación de un microsistema de innovación. El fenómeno bajo estudio es la introducción de tecnologías de generación de electricidad en una comunidad rural aislada de un país en desarrollo.

El trabajo realizado contribuye a poner en evidencia el potencial de los modelos de simulación de sistemas de innovación bajo el enfoque de Dinámica de Sistemas, como una metodología científica que permite integrar distintas perspectivas teóricas complementarias para explorar los elementos y relaciones básicas que gobiernan la evolución del sistema.

Es obvio que el trabajo de construcción del modelo de simulación para el caso abordado apenas comienza. Sin embargo, los resultados obtenidos señalan que la integración de conceptos y proposiciones del marco de los Medios de Vida Sostenible, por una parte, y de la perspectiva de los Recursos y Capacidades en el marco de la Gestión Tecnológica, por otra, es una vía rica en posibilidades de exploración teórica en torno a los sistemas de innovación en los que se involucra el desarrollo de pequeñas comunidades rurales.

Antes que posibilidades de pronóstico, el modelo de simulación construido revela interesantes posibilidades de análisis de escenarios. La fortaleza del método estriba en la posibilidad de integrar, en un solo modelo dinámico, conceptos y relaciones conocidos de manera relativamente simple, generando simultáneamente la posibilidad de entender las causas estructurales del comportamiento del sistema.

En principio, los escenarios de simulación explorados en el caso de la introducción de tecnologías energéticas en comunidades rurales aisladas son aquellos conformados por la dinámica entre capacidades y desempeño tecnológico, dinámica ampliamente estudiada en la literatura de Gestión Tecnológica: el escenario problema, en el que las capacidades son definitivamente insuficientes; el escenario de aprendizaje operativo, en el que las tecnologías se sostienen con base en capacidades mínimas de operación y mantenimiento; y el escenario de aprendizaje tecnológico, en el que los procesos de aprendizaje aseguran la acumulación de capacidades superiores que posibilitan el mejoramiento continuo y la innovación de las tecnologías.

El modelo de simulación propuesto establece un vínculo básico entre los Capitales Social y Humano y las capacidades tecnológicas y de operación, vínculo mediado en el modelo por los procesos de aprendizaje. Este vínculo es crítico para establecer una relación teórica sólida entre el marco de los Medios de Vida Sostenible y los conceptos centrales de la perspectiva de los Recursos y Capacidades. Con base en el modelo se podrían sugerir, al respecto, algunas hipótesis a investigar empíricamente, como parte del trabajo futuro.

También hay otras relaciones del modelo que podrían dar lugar a otras hipótesis para el trabajo futuro. Por ejemplo, las relaciones entre el Capital Físico asociado a la infraestructura productiva (tanto de electricidad como de bienes y servicios producidos utilizando electricidad) y las posibilidades de incrementar significativamente los Capitales Social y

Humano emergen como particularmente importantes, en tanto son centrales en la dinámica de transformación de la energía en desarrollo y viceversa.

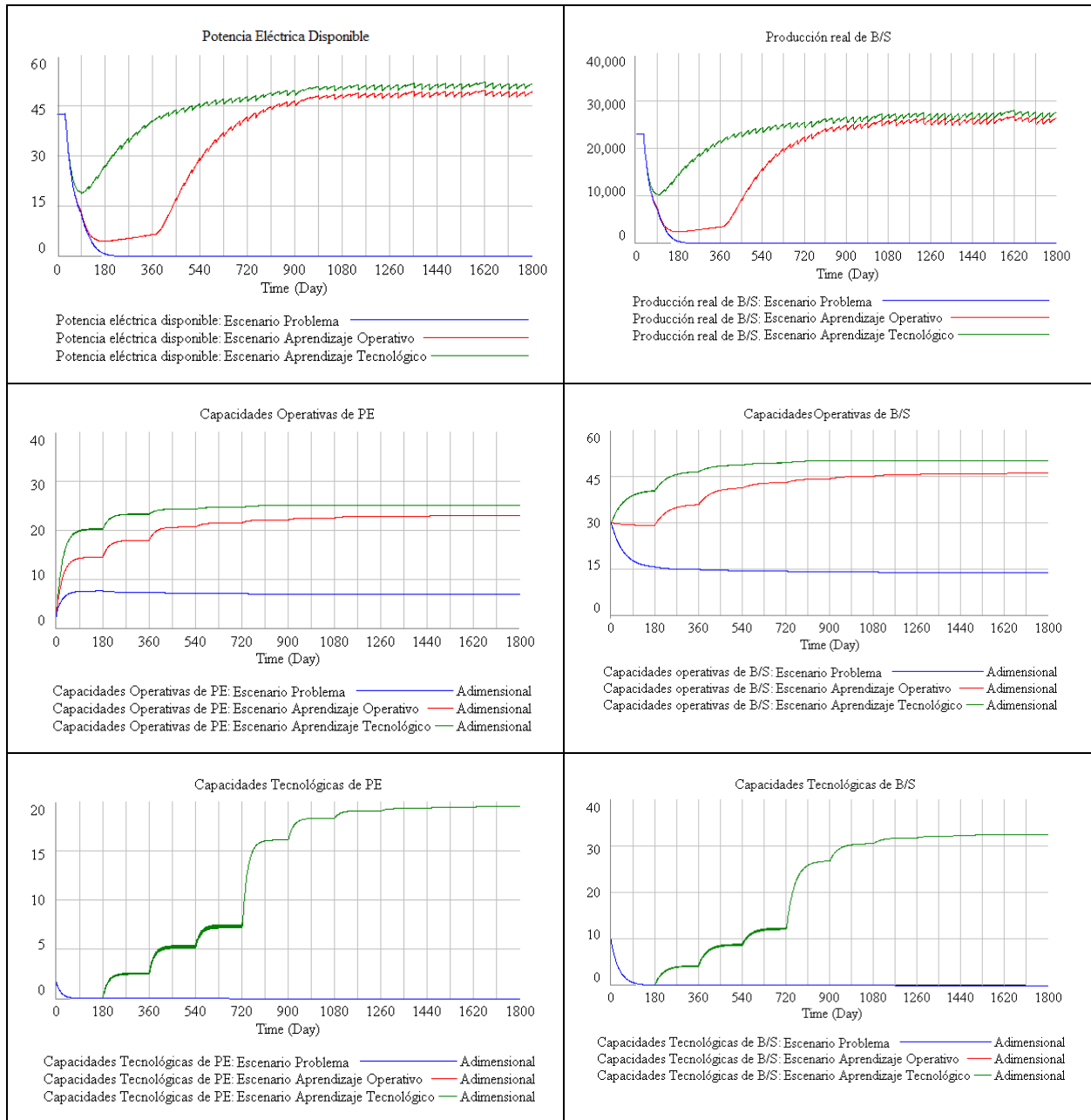


Figura 3. Evolución de las principales variables del modelo para los tres escenarios de simulación.

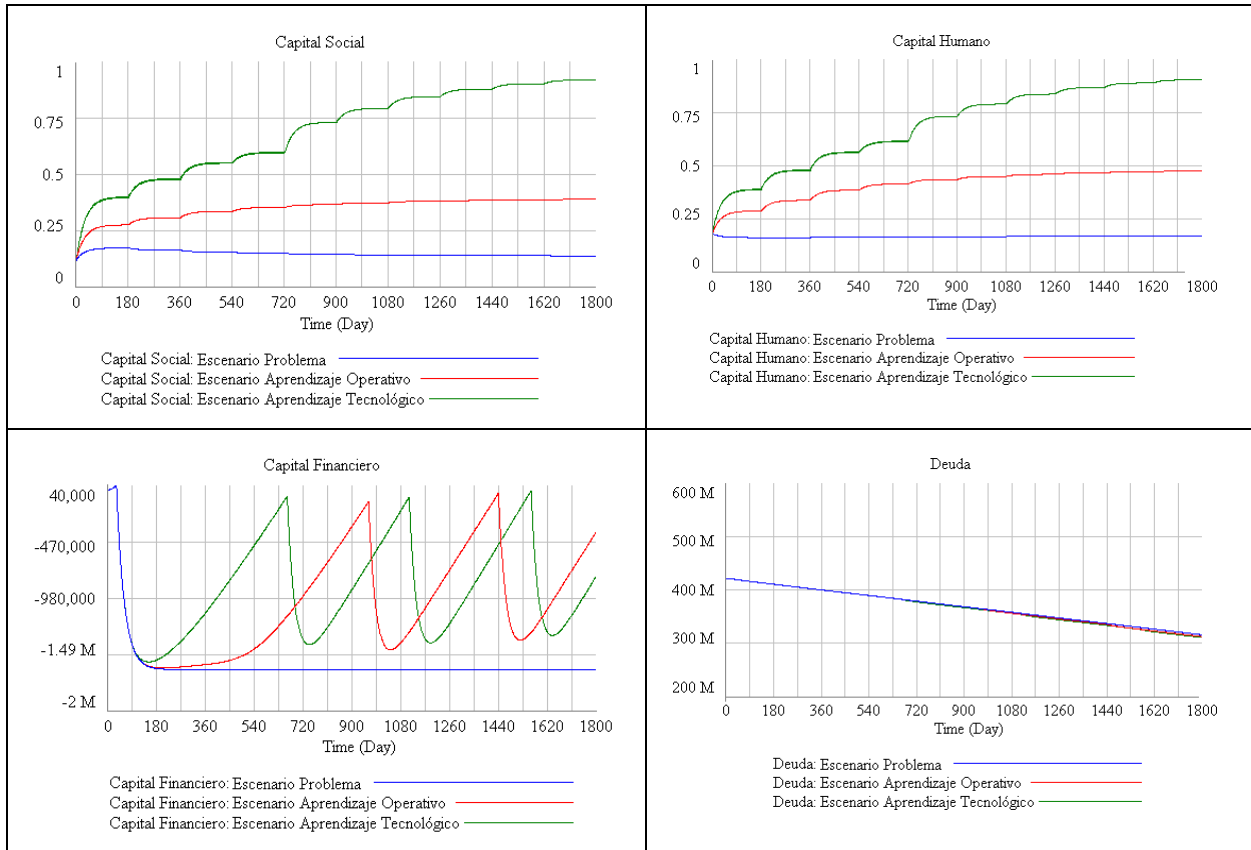


Figura 3 (continuación). Evolución de las principales variables del modelo para los tres escenarios de simulación.

Los resultados de las simulaciones sugieren que en comunidades de bajo Capital Social y Humano inicial, una inversión gubernamental adecuada y sostenida que eleve significativamente estos capitales es esencial para inducir procesos de desarrollo con base en la generación de electricidad y la producción de bienes y servicios. La sola subvención gubernamental de las inversiones iniciales asociadas al Capital Físico no parece ser suficiente. Por otro lado, el modelo exige niveles relativamente altos de Capital Físico para garantizar excedentes de producción comercial que se logren traducir en aumentos significativos de los Capitales Social y Humano. Este resultado sugiere que las comunidades tienen que acumular ciertos niveles críticos de Capitales Físico, Social y Humano, por debajo de los cuales no se pueden inducir procesos autosostenidos de desarrollo integral comunitario.

En suma, el modelo de Dinámica de Sistemas construido revela ser una propuesta interesante para el estudio del fenómeno bajo consideración, que abre posibilidades de análisis de escenarios de simulación que integran conceptos y proposiciones teóricas básicas en visiones totalizantes, a partir de las cuales se podrían identificar dinámicas del sistema bajo estudio para su investigación posterior. Como es natural, el modelo propuesto es susceptible de mejoras y ajustes; hasta el momento, su construcción responde a una visión planificadora racional, que podría ser cambiada después por una aproximación más adaptativa, respondiendo a un comportamiento más real de los agentes del sistema y expandiendo aún más las posibilidades del modelo de simulación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias y a GUÍO Español por la financiación otorgada al proyecto “Plataforma para el Soporte a la Evaluación de Políticas y a la Toma de Decisiones en Energización de Zonas No Interconectadas en Colombia”, en el marco del cual se realizó el trabajo aquí presentado. Igualmente, agradecen a los demás integrantes del equipo del proyecto, particularmente a los profesores José Javier Aguilar, de la Escuela Ingeniería de la Organización, Universidad Nacional de Colombia; Isaac Dyer y Gloria Patricia Jaramillo, del Instituto de Ciencias de la Decisión, Universidad Nacional de Colombia; y Judith Cherni, del Imperial College, Londres, por sus sugestivos comentarios y su invaluable contribución a abrir los espacios de discusión donde se fraguaron muchas de las ideas aquí presentadas.

Referencias

- American Council on Competitiveness (2004) *Innovate America: National Innovation Initiative Report*.
- Arrow, K. (1962) The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic Studies*, 29, 166-170.
- Axelrod, R. (1997) Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. In: Conte, R.; Hegselmann, R. & Terna, P. (eds.) *Simulating Social Phenomena*. Berlin: Springer, pp. 21-40.
- Bell, M. (1984) Learning and the Accumulation of Industrial Technological Capacity in Developing Countries. In: Fransman, M. & King, K. (Eds.) *Technological Capability in the Third World*, Macmillan.
- Ceballos, F; Robledo, J. & Aguilar, J.J. (2005a) Capacidades tecnológicas para la introducción de tecnologías energéticas en comunidades rurales. *Memorias del III Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas*, Cartagena (Colombia), 29 de noviembre a 2 de diciembre.
- Ceballos, F; Robledo, J. & Aguilar, J.J. (2005b) El proceso de absorción de tecnologías energéticas en comunidades rurales aisladas bajo un enfoque de dinámica de sistemas. *Memorias del VII Seminario Internacional sobre Análisis y Mercados Energéticos y I Seminario CERES*, Bogotá, 5 al 7 de octubre.
- Cohen, W.M. and Levinthal, D.A. (1989). Innovation and Learning: The Two Faces of R&D. *The Economic Journal*, Vol. 99, Sep., 569-596.
- Conte, R.; Hegselmann, R. & Terna, P. (eds.) (1997) *Simulating Social Phenomena*. Berlin: Springer.
- DFID – UK Department for International Development (2002) *Issues Energy for the poor*. London: August.
- DFID – UK Department for International Development (2003) *Hojas Orientadoras sobre los Medios de Vida Sostenible: Sección 2: Marco*. http://www.livelihoods.org/info/guidance_sheets_rtf/SP-GS2.rtf, http://www.livelihoods.org/info/info_guidancesheets.htm. Fecha de consulta: marzo de 2005.
- Dodgson, M. (1991a) Technology learning, technology strategy and competitive pressures. *British Journal of Management*, Vol. 2, pp. 133-149.
- Dodgson, M. (1991b) *Technological Collaboration and Organisational Learning: A Preliminary Review of Some Key Issues*. DRC Discussion Paper No. 85, Science Policy Research Unit, University of Sussex, Brighton.

- Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R.R., Silverberg, G. & Soete, L.L.G. (Eds) (1988) *Technical Change and Economic Theory*. London: Pinter Publisher.
- Fransman, M. & King, K. (Eds.) (1984) *Technological Capability in the Third World*. Macmillan.
- Freeman, C. (1987) *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. London: Pinter Publishers.
- Freeman, C. (1995) The 'National System of Innovation' in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics*, Vol. 19, pp. 5-24.
- Lundvall, B-Å. (1985) *Product Innovation and User-Producer Interaction*. Aalborg: Aalborg University Press.
- Lundvall, B-Å. (1988) Innovation as Interactive Process: From User Producer Interaction to the National Systems of Innovation. En: Dosi, G. et al (eds.) *Technical Change and Economic Theory*. London: Pinter Publishers.
- Pitt, J. C. (2000) *Thinking about technology - Foundations of the Philosophy of Technology*. New York: Seven Bridges Press.
- Prasad, J. & Villa, J. (2002) *Implementation of Renewable Energy Technologies – Opportunities and Barriers*. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Risø National Laboratory. Denmark.
- Robledo, J.; Aguilar, J.J. & Ceballos, F. (2005) Capacidades Tecnológicas para la Introducción de Tecnologías Energéticas en Comunidades Rurales Aisladas. *Memorias del XI Seminario Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica*, ALTEC 2005, realizado en Salvador (Brasil), del 25 al 28 de octubre.
- Rosenberg, N. (1982) Learning by Using, in: Rosenberg, N. (Ed.) *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 120-140.
- Rosenberg, N. (Ed.) (1982) *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sharif, N. (2006) *Emergence and development of the National Innovation Systems concept*. *Research Policy*, Vol. 35, pp. 745–766
- Sterman, J. (2000) *Business Dynamics – Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill.
- Teece, D. & Pisano, G. (1994) The Dynamic Capability of Firms: an Introduction. *Industrial and Corporate Change*, 3 (3) 537-556.
- UNDP (2002) *Human Development Report*. En <http://hdr.undp.org/reports/global/2002/en/>. Fecha de consulta: mayo 16 de 2005.
- Winter, S. G. (2000) The satisficing principle in capability learning. *Strategic Management Journal*, 21, 981-996