

Simulación al servicio de la sociedad colombiana

Luis Antonio Garavito Herrera*

Las diversas aplicaciones tecnológicas diseñadas para incrementar la “calidad de vida” de los colombianos, han incluido diversos procedimientos que han puesto en riesgo no sólo la vida sino también el medio para sustentarla. Ahora bien, si hablamos de la sociedad, la complejidad es aún mayor, ya que el tejido social que se ha creado por siglos y se recrea diariamente entre los seres humanos y su entorno es complejo. Por eso se requiere el diseño de herramientas que desde la ingeniería busquen crear “laboratorios de ensayos” que no sólo permitan determinar el impacto de políticas sino, además, optimizar el uso de los recursos. Así como en diferentes industrias existe la posibilidad de construir plantas piloto, laboratorios de pruebas, ensayos o maquetas, que permiten experimentar con diferentes materiales o procedimientos, así mismo existen, aunque aún no muy difundidas en nuestro país, herramientas que de alguna manera nos hacen posible modelar estas interacciones entre seres humanos y su ambiente.

Los modelos de simulación por computadora son una de estas herramientas que pueden, no sólo replicar el comportamiento actual sino que, además, nos permiten probar políticas administrativas, procedimientos o planes de inversión, y a partir de sus resultados, poder priorizar aquellas medidas que tengan un mayor impacto benéfico para la comunidad. Además, se pueden establecer patrones de comportamiento de variables o tendencias que formulen “leyes” que permitan entender aún más el porqué de la ocurrencia de algunos fenómenos.

En Colombia el uso de los modelos de simulación no es un tema novedoso. Se han utilizado simulaciones para optimizar procesos industriales, cadenas logísticas,

transporte, prestación de servicios, así como en cualquier parte del mundo [Véase, http://www.dl.com.co/casos_fr.htm]. Pero existe una especial limitante en la popularización de estas herramientas en la vida cotidiana de los campos públicos o privados, consistente en la necesidad de contar con personal idóneo en el uso de herramientas estadísticas, computacionales, de lenguajes de programación y técnicas de simulación. Por eso la mayoría de las aplicaciones en simulación se han dado por parte de la gran empresa o de universidades.

Por otra parte, existen principalmente dos enfoques para el diseño de modelos de simulación por computadora. Uno de ellos, enfocado a la simulación de eventos discretos utilizando procesos estocásticos, de amplia difusión, de gran versatilidad y gran utilidad. El otro es una aproximación a los modelos de simulación continuos o de dinámica de sistemas. Esta clase de modelos continuos, es el tema central de este documento, ya que de los modelos anteriores existen diversos ejemplos y aplicaciones en Colombia.

Los modelos continuos tienen diferentes aplicaciones y son de especial utilidad para simular problemáticas ambientales, uso de recursos naturales, administración pública, medicina, derecho y muchos más campos, dado que se basan en la interpretación de las problemáticas como sistemas. Los modelos de simulación continuos contribuyen al estudio de sistemas inestables, en donde los ciclos de realimentación son importantes. El enfoque

* M.Sc. en Ingeniería Industrial
Profesor asistente Universidad Nacional de Colombia
Departamento Ingeniería Industrial

sistémico permite interpretar la dinámica de su comportamiento y elaborar escenarios para ensayar diversas políticas y visualizar sus efectos en el corto, mediano y largo plazo. Es necesario resaltar que ésta no es una técnica novedosa en Colombia¹. Pero a pesar de su gran potencialidad y utilidad, ha tenido una muy baja utilización en la solución de problemas en nuestro país.

En este documento se hará una breve reseña a lo que son los modelos de simulación continuos y sus principales características, y se presentará un ejemplo de la aplicación de este tipo de modelos a un problema real de una pequeña comunidad colombiana. Lo que se pretende es presentar, de la manera más simple, las principales características de la simulación continua o dinámica de sistemas, y enseñar cómo ésta puede ser una herramienta clave para la planeación de problemas nacionales.

MODELOS DE SIMULACIÓN

La utilización de modelos de simulación para representar sistemas es una metodología que es usada para guiar la toma de decisiones, con el objeto de advertir las posibles consecuencias que puedan traer. La toma de decisiones por lo general consiste en la elección entre una variedad de alternativas, las cuales son descartadas o tomadas en cuenta de acuerdo con el efecto que vayan a producir cada una de ellas en el sistema, tarea que es facilitada por un modelo de simulación adecuadamente diseñado.

El modelo de simulación es el puente entre las acciones y la visualización de sus posibles consecuencias, lo cual determina la pertinencia y utilidad del mismo. Cabe anotar que en la mente humana no se tienen ciudades, regiones o naciones, sino solamente imágenes o abstracciones del mundo, lo cual hace evidente que todos los modelos son incompletos y simplistas.

Existe una gran variedad de modelos matemáticos, físicos, arquitectónicos, etc. Pero la clase de modelos que son tratados aquí son modelos continuos, que en gran medida corresponden a una representación abstracta de un sistema real. En ellos se puede distinguir un conjunto de definiciones que permiten identificar los elementos que constituyen las variables del modelo y un conjunto de relaciones que especifican las interacciones entre los elementos que aparecen en el modelo.

Los procesos de simulación son, posiblemente, las herramientas más poderosas y populares para la toma

de decisiones. La simulación es un proceso numérico diseñado para experimentar el comportamiento de cualquier sistema, en una computadora. Los modelos de simulación tuvieron su origen hace centenares de años, pero en los años sesenta estas técnicas se diversificaron debido a su amplio campo de aplicación y el surgimiento de los computadores. Estos modelos se pueden clasificar en dos clases: los modelos continuos y los modelos discretos.

Los modelos de simulación discretos están basados en procesos estocásticos y en las técnicas Monte Carlo. Los modelos de simulación continua (como se mencionó anteriormente) son aquellos con soporte fundamental en funciones continuas y ecuaciones lineales, no lineales y diferenciales; en términos generales, no dependen en forma significativa de variables aleatorias (a no ser que el sistema tenga alguna variable estocástica con el objeto de producir "ruido").

MODELOS CONTINUOS

Los modelos continuos o de dinámica de sistemas están enfocados a entender la estructura subyacente de un sistema. Permiten entender las interrelaciones entre partes e ir más lejos que la simple observación de fenómenos. Una característica de estos modelos es que sus salidas responden a entradas que son el resultado del propio comportamiento del sistema. Esta es una propiedad que puede catalogar a estos sistemas como cerrados, porque los elementos de entrada al sistema no están aislados de éste, lo cual trae una consecuencia fundamental y es que su comportamiento actual depende de las acciones pasadas en el mismo sistema. Es necesario destacar que puede que el sistema esté influido por variables externas a él, pero dicha influencia no condiciona el comportamiento del mismo, como se verá más adelante.

En consecuencia, aparece un nuevo concepto que es fundamental en este tipo de modelos: las realimentaciones o *feedback*. Las realimentaciones dentro de la estructura del sistema permite que los resultados de las acciones pasadas del sistema vuelvan a controlar las acciones futuras. Las realimentaciones pueden

1 Véase Isaac Dynet, *Dinámica de sistemas y simulación continua en procesos de planificación*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1993.

ser de dos tipos: positiva, si la estructura encuentra en el sistema fuerzas de crecimiento, y negativa si la estructura encuentra en éste, fuerzas que causan fluctuaciones, inestabilidades o decrecimientos.

Para la construcción de un modelo en dinámica de sistemas se debe seguir una serie de pasos, que no deben ser interpretados como una cascada en donde hay un siguiente paso lógico e inequívoco. Por el contrario, el superar cada paso simplemente enriquece cada vez el modelo. Los pasos principales son:

- Investigación de toda la documentación disponible acerca del tema sobre el que se va a construir el modelo
- Elaboración del diagrama causal
- Elaboración del diagrama de simulación o de Forrester
- Definición de las ecuaciones
- Pruebas y validación
- Análisis de resultados

El paso por cada etapa enriquece el modelo, pero el paso siguiente no es una consecuencia lineal de haber hecho el anterior.

DIAGRAMA CAUSAL

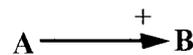
Es un bosquejo esquemático de las interacciones entre elementos que constituyen el sistema, en el cual los nombres de las principales variables están unidos por flechas. El diagrama causal permite conocer la estructura de un sistema dinámico; esta estructura viene dada por la especificación de las variables que aparecen en el mismo y por el establecimiento de la existencia (o no existencia) de una relación entre estas variables.

A este nivel de análisis de la estructura, lo único que interesa es saber si existen relaciones o no, ya que el tipo de relación se determina en el diagrama de Forrester. El estilo de los diagramas de causalidad es el siguiente: suponga que dos variables de un sistema A y B se ligarán entre sí por una flecha cuyo sentido indica la relación causal.

$A \rightarrow B$

Sobre la cabeza de la flecha se coloca un signo, de acuerdo con el tipo de relación que exista entre las variables. Por ejemplo, si al aumentar (o dismi-

nuir) **A** corresponde un aumento (o disminución) de **B**, se denota así:



Se dice entonces que existe una relación positiva. Por otra parte, si un aumento (o disminución) de **A** corresponde a una disminución (o aumento) respectivamente de **B**, se denota así:



Se dice entonces que tiene una relación negativa.

Al construir el diagrama causal, en primer lugar se eligen los elementos o variables que se van a emplear en el modelo; seguidamente se comienzan a establecer las relaciones cualitativas que ligan las variables del modelo; luego el modelo entra en una fase de refinamiento, que busca acercar más el diagrama a la imagen mental que se quiere representar.

La principal aplicación de los diagramas causales es identificar los bucles de realimentación y los retardos. Los bucles pueden ser de dos tipos:

- *Bucles de realimentación positiva*
- *Bucles de realimentación negativa*

Los bucles de realimentación positiva son aquellos en los que la variación de un elemento se propaga a lo largo del bucle, de manera que se refuerza la variación inicial. Es lo que Peter Senge llama realimentación reforzadora, en la que se presentan patrones donde las cosas crecen o se aceleran comportamientos. En este tipo de procesos, un cambio pequeño se alimenta de sí mismo y es amplificado produciendo movimiento en la misma dirección. Como se muestra en la figura 1, los bucles de realimentación positiva presentan crecimientos de tipo exponencial y se asemejan a una bola de nieve que rueda por la montaña: en la medida en que avanza, cada vez es más grande.

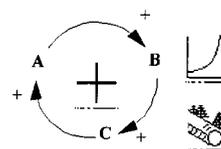


FIGURA 1. Bucle de realimentación positiva. (Diagramas producidos con Vensim PLE de Ventana Simulation).

Los bucles de realimentación negativa son aquellos en los que la variación de un elemento se transmite a lo

largo del bucle de manera que determine una variación que contrarreste la variación inicial. Este tipo de bucles busca la estabilidad del sistema en torno a algún objetivo. Por ejemplo, en la figura 2 podemos observar un bucle en donde **A** podría ser la tasa de natalidad de una población, **B** la población y **C** la cantidad disponible de alimentos. El bucle se leería así: a una mayor tasa de natalidad, es mayor la cantidad de población; con una mayor población, menor disponibilidad de alimento, y a menor disponibilidad de alimento, se reduce la tasa de natalidad, convirtiendo el bucle en un proceso compensador que puede reflejar un comportamiento en el nivel de población (del tipo de las figuras anexas al bucle en la figura 2).

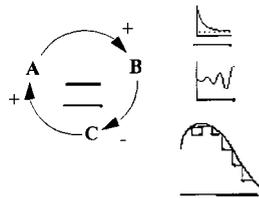


FIGURA 2. Bucle de realimentación negativa. (Diagramas producidos con Vensim PLE de Ventana Simulation)

Es importante resaltar que la existencia de bucles de realimentación es lo que determina un comportamiento peculiar para un sistema dinámico. En el estudio de los sistemas dinámicos, la consideración del tiempo es esencial, porque la evolución de los sistemas dinámicos discurre en el tiempo. En consecuencia, los retardos o demoras que se producen en la transmisión de información o de los bienes materiales son características importantes que deben manejarse con especial atención en el modelado de sistemas dinámicos.

Al construir el diagrama causal de un sistema debe considerarse que la relación causal que liga a dos variables puede implicar una el transcurso de cierto tiempo.

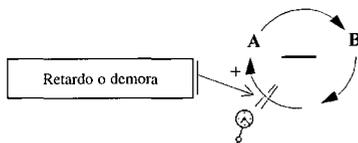


FIGURA 3. Representación de un retardo. (Diagramas producidos con Vensim PLE de Ventana Simulation).

Las demoras o retardos son propios de la naturaleza y de las actividades humanas; se invierte hoy para reeditar en el futuro. La satisfacción de las necesidades de vivienda no son instantáneas, ni los productos que se sacan a vender se venden instantáneamente en su totalidad. Los retrasos producen ajustes graduales entre las variables; éstos implican la relación de una acumulación de material o de la información que se retrasa.

Finalmente, la clave para leer diagramas causales consiste en ver círculos de causalidad en vez de líneas rectas. Se busca ver la “historia” que cuenta el diagrama, interpretar cómo la estructura crea un(os) patrón(es) de conducta determinado(s) y hallar la manera de influir sobre ese patrón.

DIAGRAMA DE SIMULACIÓN O DE FORRESTER

La concepción del diagrama causal brinda los elementos necesarios para llevar el modelo plasmado a un modelo de simulación en algún software diseñado para dinámica de sistemas. Como el primer software de esta clase fue DYNAMO, diseñado por J. W. Forrester (y los demás programas, a pesar de que en algunos casos usan símbolos diferentes, todos son bastante homogéneos en su estructura básica), las representaciones de los modelos para ser ya simulados son comúnmente denominados diagramas de Forrester o diagramas Dynamo.

Los símbolos usados por Forrester se ven en la figura 4, que con ligeras variaciones son usados en software para dinámica de sistemas como Ithink, Vensim, Stella o Evolución. En el diagrama de Forrester, los distintos elementos constituyentes del diagrama causal se representan por medio de variables, las cuales pueden ser clasificadas en tres grupos: variables de nivel, variables de flujo y variables auxiliares.

Las variables de nivel constituyen aquel conjunto de variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema. Los niveles representan magnitudes que se integran o acumulan como resultado de la acción del sistema en el pasado. Los niveles sólo son afectados por flujos. La representación de un nivel en un software especializado puede ser como lo indica la figura 5.

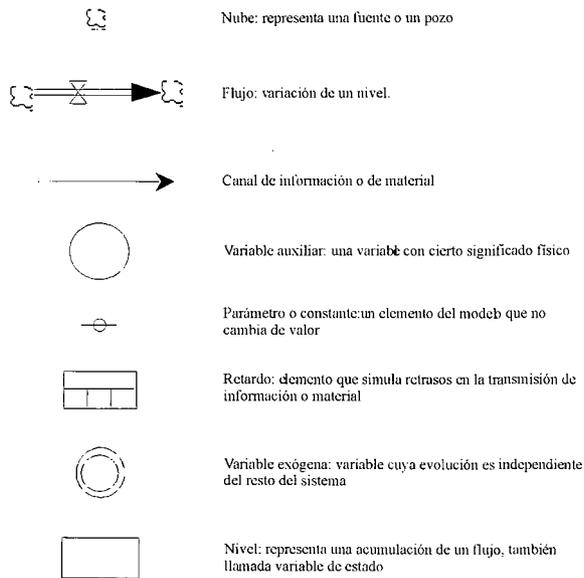


FIGURA 4. Símbolos diagrama de Forrester.

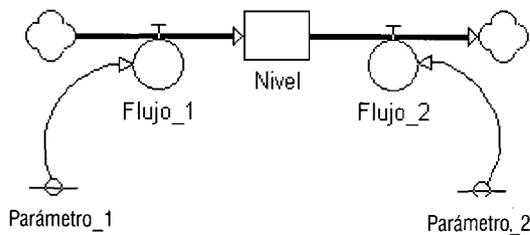


FIGURA 5. Diagrama de Forrester de un solo nivel en el software Evolución 2.0 desarrollado por la Universidad Industrial de Santander.

La ecuación que representa la evolución del nivel es la siguiente:

$$Nivel(t) = Nivel(t-1) + \int_0^T (Flujo_1 - Flujo_2) dt$$

siendo los datos correspondientes a los enunciados de la figura 5. Esta ecuación se puede escribir de forma aproximada, empleando el método de integración numérica de Euler (método de Euler-Cauchy o de pendiente puntual²), que es una de las maneras como el software calcula los niveles:

$$Nivel(t + \Delta t) = Nivel(t) + \Delta t [Flujo_1 - Flujo_2]$$

Las variables de flujo son las que determinan las variaciones en los niveles del sistema; éstas no pueden ser medidas instantáneamente, por no tener memoria; es decir, si se detiene el tiempo, ellas no acumulan nin-

gún valor. En otras palabras, dada su naturaleza, estas variables no son cuantificables en sí, sino por los efectos que producen en los niveles con los que están relacionadas. Caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en los correspondientes niveles; además, determinan cómo se convierte la información disponible en una acción o actuación. Una variable de flujo sólo puede afectar niveles y no pueden «conectarse» con otras variables de flujo.

Las variables auxiliares representan pasos o etapas en los que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los niveles, por constantes o por tablas. Las variables auxiliares sirven, adicionalmente, para representar las no linealidades que se presentan en un sistema.

ECUACIONES DEL MODELO

Es el paso siguiente en el diseño de un modelo dinámico. Hasta este momento se tienen las variables y la forma como se relacionan, se determinó cuáles de ellas son niveles, variables de flujo o variables auxiliares; ahora se establece la forma de la relación entre las variables a partir de las ecuaciones que rigen el comportamiento de los componentes del modelo (que a su vez determina la evolución del sistema).

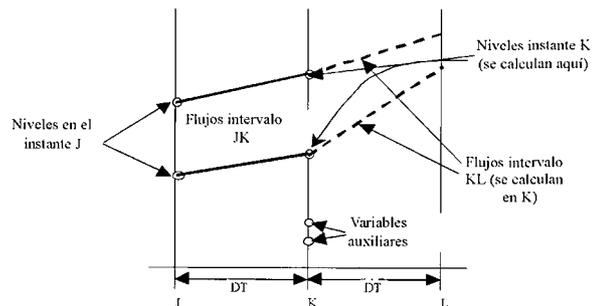


FIGURA 6. Manejo del tiempo en los modelos de dinámica de sistemas.

A decir verdad, la forma de las ecuaciones de dinámica de sistemas es simple desde el punto de vista de su formulación matemática. El modelo, por simple que parezca, está formado por ecuaciones diferenciales de orden mayor que uno, que pueden producir

² Véase Chapra y Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, México: McGrawHill, 1998.

comportamientos inestables, y cuya solución analítica puede ser bastante dispendiosa en los casos donde ésta sea posible. Afortunadamente para el usuario de la dinámica de sistemas, no es necesario ser consciente de esta situación, ya que el software disponible para este tipo de aplicaciones hace que sea transparente para el usuario (a no ser que se resuelvan en lenguajes de programación de alto nivel como FORTRAN, Basic, C, C++, etc.).

El método de cálculo está basado en la actualización de los niveles del sistema, en razón de los flujos de entrada y de salida a los que están ligados después del intervalo de tiempo DT (véase figura 6). Teniendo como referencia los instantes J, K y L distanciados por DT (unidades de tiempo), se procede a evaluar el estado de los niveles en el instante K, con base en la situación en que se encontraban en J, y con los flujos producidos en el intervalo de tiempo JK. A continuación se actualizan las variables auxiliares, y posteriormente se proyectan los flujos para el intervalo KL (cabe reiterar que lo anterior lo hace el programa de aplicación específica y sólo se menciona como referencia).

Ahora se describirá la forma básica de cómo se establecen las ecuaciones para los modelos de dinámica de sistemas:

- Ecuaciones de nivel, las cuales establecen el contenido de los niveles del sistema en el instante K, sumando los flujos que entran (establecidos en el instante JK) menos los flujos que salen (establecidos en el momento JK) más la cantidad que se encontraba en el nivel en el instante J. Por ejemplo, para la figura 5, la ecuación del nivel es:

$$Nivel.K = Nivel.J + DT(Flujo_1.JK - Flujo_2.JK)$$

- Ecuaciones de flujo, que establecen las tasas de flujo entre los niveles del sistema. Por ejemplo, para la figura 5, tiene la forma:

$$Flujo_1.KL = Parámetro_1 * Nivel_1.K$$

- Ecuaciones auxiliares: se establecen dependiendo del tipo de cálculo que se requiera para simular una política; éstas afectan algún flujo. Pueden contener multiplicadores (en donde todas las variables relacionadas con la variable auxiliar se multiplican entre sí), sumas o sustracciones entre sus

valores relacionados, o una no linealidad (son relaciones entre dos variables en donde una está en función de la otra y su relación no es lineal), por ejemplo, $f(g)$ en donde la relación puede ser como aparece en la figura 7.

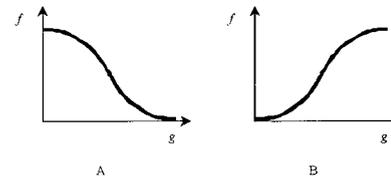


FIGURA 7. Representación por puntos de la relación no lineal que liga a la variable f con la variable g. La parte A representa, por ejemplo, la relación que puede existir entre el desempleo y la inmigración: a mayor desempleo, menor inmigración y viceversa; la parte B representa la relación, que por ejemplo puede existir entre el desempleo y la emigración: a mayor desempleo, mayor emigración y viceversa.

Las no linealidades se expresan en forma de tabla, cuya ecuación por lo general se establece determinando el máximo y el mínimo valor de cada una de las variables y las coordenadas de cada uno de los puntos que se desee listar.

- Ecuaciones para los retardos: pueden ser de tres tipos, de acuerdo con el orden del retardo. Éste viene dado por el número de niveles necesarios para la simulación del mismo. El retardo de tipo 1 se produce por la acción combinada de un nivel y un flujo; es también llamado retardo exponencial. Por ejemplo, cuando se expone una nueva película en donde la expectativa es muy grande, la cantidad de personas que asisten a los teatros tienen un comportamiento de este tipo. El retardo de tipo 2 o de segundo orden, corresponde a dos retardos seguidos de primer orden. De manera similar, el retardo de tipo 3 corresponde a la suma de tres retardos de tipo 1. Estos dos últimos pueden representar, por ejemplo, cuando una empresa manda una tarjeta de navidad a sus clientes, que la forma como se reciben las tarjetas a lo largo de los siguientes días tienen comportamientos de este tipo (véase figura 8).

Existe una clase de retardo especial llamado de orden infinito o de tubería, en donde el material o la información llega en su totalidad al destino indicado al finalizar el tiempo del retardo. Sirve por ejemplo, para representar la construcción de una presa, en donde la disponibilidad de agua no se tiene sino cuando finaliza todo el proyecto.

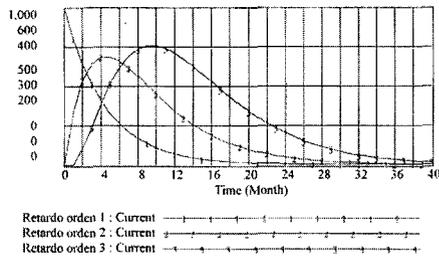


FIGURA 8. Tipos de retardos en dinámica de sistemas.

El funcionamiento en el modelo de un retardo está afectado por los valores del tiempo de retardo, el orden del retardo y la diferencial de tiempo o DT (véase figura 6). La razón de ello reside en que si el DT es demasiado grande, los niveles internos del retardo acumulan una cantidad demasiado grande de aquello que se está retardando, y posiblemente el flujo de salida alcanzará valores demasiado grandes; ello a su vez, puede vaciar excesivamente las variables de nivel, de manera que en un instante posterior los flujos de salida se hagan demasiado pequeños o incluso tomar valores negativos.

Este comportamiento puede ser evitado haciendo:

$$DT \leq \frac{\text{Retardos}}{2n}$$

donde *Retardos* es el valor promedio de todos los retardos en el modelo y *n* es el valor correspondiente al mayor orden del retardo. Forrester, en 1961, enunció esta fórmula sin justificación alguna; a pesar de que se ha trabajado bastante en este aspecto, no se ha logrado un consenso para una fórmula definitiva, y por tanto es recomendable seguir usando este criterio.

VALIDACIÓN DEL MODELO

De acuerdo con Dyner, los modelos de dinámica de sistemas tienen dos objetos principales:

- Deben explicar el comportamiento del sistema en razón de su estructura y sus políticas de orientación
- Deben servir como instrumentos para estudiar cambios estructurales o políticos del sistema.

Un modelo válido es aquel que cumple con estos dos objetivos. Pero lo más importante de un modelo de dinámica de sistemas es su aptitud, es decir, si es útil o no; como lo expresa el mismo Forrester, “un modelo debe ser juzgado por lo adecuado que sea para un

propósito particular. Un modelo es fuerte y defendible si logra lo que se espera de él... La validación como concepto abstracto divorciado de su propósito no tiene significado útil”.

Dentro del proceso de validación, según Dyner, se debe plantear una serie de preguntas tendientes a evaluar la aptitud de la estructura del modelo. Entre ellas tenemos:

- ¿Es la estructura consistente con el conocimiento relevante descriptivo del modelo?
 - ¿Son los parámetros consistentes con el conocimiento relevante descriptivo y numérico del modelo?
 - ¿Cada ecuación tiene sentido, aun cuando sus entradas tomen valores extremos?
 - ¿Son los conceptos importantes endógenos al modelo?
 - ¿Es cada ecuación dimensionalmente consistente con su correspondiente contraparte en el mundo real?
- Evaluando el comportamiento del modelo se deben plantear las siguientes preguntas:
- ¿Reproduce el modelo los síntomas del problema y el comportamiento observado en la vida real?
 - ¿Se presenta un comportamiento anómalo al eliminar alguna hipótesis del modelo?
 - ¿Puede el modelo reproducir el comportamiento en otros casos similares?
 - ¿Muestra el modelo algún comportamiento sorpresa o un modo de comportamiento no reconocido previamente?
 - ¿Se comporta el modelo de manera adecuada cuando se somete a políticas extremas?
 - ¿Es sensible a variaciones de los parámetros?
 - ¿Es el comportamiento del modelo similar al de la vida real?

EJEMPLO DE APLICACIÓN EN DINÁMICA REGIONAL

Una vez explicado el soporte metodológico de esta técnica de simulación, para observar sus ventajas y su potencialidad hacia la interpretación de problemáticas nacionales, se presentará un ejemplo de la metodología en dinámica regional³. Las regiones se han convertido en el derrotero para los planes de desarrollo de muchos paí-

3 Este modelo fue desarrollado por el autor para un proyecto de investigación en desarrollo regional de la Universidad de los Andes, dirigido por el doctor Eduardo Aldana.

ses. Se utilizan modelos de simulación en dinámica regional usando dinámica de sistemas, con el objeto de dar un soporte para la toma de decisiones en un proceso de desarrollo regional. Ésta es una herramienta que ayuda a dar soporte en el proceso de toma de decisiones, evaluar el impacto de políticas o visualizar la conveniencia o inconveniencia de uno u otro curso de acción, con el fin de mejorar las condiciones de la región.

La problemática de las regiones rurales colombianas es un tema de bastante complejidad, debido a las características de su población, a la diversidad de recursos de que dispone o de la infraestructura con que cuenta. A pesar de ello, es necesario iniciar estudios que tiendan al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes, expresado como una satisfacción plena de sus necesidades básicas, una confianza en el futuro y una sensación de bienestar⁴.

El no contar con estas características ha generado en muchas regiones migraciones que tienden a despoplar unas zonas y a sobrepoblar otras. Es por eso que se requiere establecer cómo “funciona el mecanismo” en la dinámica de las regiones rurales colombianas, para de esta forma plantear medidas que mejoren la calidad de vida de sus habitantes y evitar que emigren.

Ahora bien, los sistemas sociales poseen dos características particulares: su dinámica y su interdependencia entre variables. Un intento importante por interpretar estas características es la *dinámica de sistemas*, la cual está íntimamente ligada al área del conocimiento a la que pertenece la teoría general de sistemas, la teoría de la automática y la cibernética; constituye el estudio de cómo la estructura de realimentación causada por la interdependencia de las variables del sistema produce un comportamiento dinámico. Por sus características, esta técnica es utilizada para hacer la aproximación al modelo de la dinámica rural colombiana.

Finalmente, este modelo se generó con el software Vensim® PLE de la compañía Ventana Systems, que coloca esta versión libre sólo con propósitos académicos.

REGIÓN DE ESTUDIO

La región en la que se aplicó el modelo fue Junín, Cundinamarca. Una población a 103 kilómetros de Bogotá, conformada por 25 veredas, las cuales ocupan un área aproximada de 34.412 hectáreas (344,12 km²), con

una densidad de población de 22 habitantes por kilómetro cuadrado, una población de 9.900 habitantes en 1994 y perteneciente a la región del Guavio. Junín dedica aproximadamente el 12% de su territorio a actividades agrícolas, de las cuales casi en su totalidad están destinadas a cultivos transitorios. Estos cultivos transitorios se hacen en 3.800 hectáreas, con una producción anual de 5.280 toneladas (evaluación realizada en 1994). Los cultivos permanentes se hacen en 308 hectáreas que producen anualmente 1.250 toneladas. Los principales productos cultivados allí son tubérculos como la papa y la arracacha, y algunas frutas como mora y lulo.

ESTRUCTURA DEL MODELO

La aproximación al modelo que busca interpretar la dinámica de una región rural colombiana se realiza a partir de considerar cinco sectores:

- Población
- Viviendas
- Empleos
- Educación
- Migraciones

En el sector de población, los habitantes están divididos, de acuerdo con la edad, en niños, adultos y ancianos, en donde entre ellos existe una relación de retardo de acuerdo con el crecimiento o envejecimiento y la suma de cada una de las tres categorías da la población total.

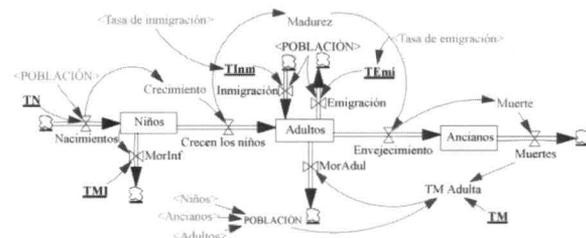


FIGURA 9. Sector población.

En la medida en que exista una mayor (o menor) población, esto determina que en la región haya una mayor (o menor) cantidad de familias, que están relacionadas con el número de viviendas disponibles, lo cual establece las necesidades de vivienda en la región.

4 Este modelo fue desarrollado en una región que no tuvo en cuenta la violencia como elemento a simular.

Adicionalmente, en el sector vivienda se tiene en cuenta el uso de las áreas de terreno de la región. En la medida en que hay más viviendas, es mayor el área dedicada al sector urbano; en la medida en que se dediquen más áreas al sector urbano, hay menos áreas para el sector rural; en la medida en que existan más áreas para el sector rural, existen menos áreas baldías o disponibles lo que a su vez disminuye las áreas para el sector urbano, en donde, en la medida en que existan más industrias básicas, aumenta el área dedicada al sector rural.

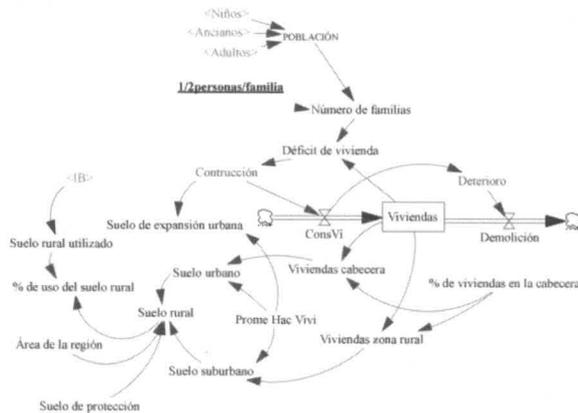


FIGURA 10. Sector viviendas.

El sector educación está inicialmente relacionado con los niños, porque en la medida en que existan más niños, más personas con educación básica habrá; claro está que este ciclo reforzador se encuentra equilibrado por la deserción académica en educación básica y los cupos disponibles en la región para la educación básica. Las personas que efectivamente se gradúen de primaria con un retardo que equivale al tiempo para cursar todos los niveles, pasan a educación secundaria, y ellas a su vez, se ven limitadas por los cupos disponibles en la región para este nivel educativo y por la deserción académica. Con un retardo equivalente al tiempo que duran en cursar todos los niveles de secundaria, ingresan a educación superior (técnica o profesional), la cual está a su vez limitada por los cupos disponibles, y disminuida por la deserción académica.

El sector empleos está conformado por las industrias básicas, que se ven reforzadas por el crecimiento económico pero a la vez son disminuidas por la salida del mercado de estas empresas. Las industrias básicas forman parte de un bucle de realimentación positiva junto con la disponibilidad de personas profesionales o técnicas de la re-

gión, porque en la medida en que existan más personas con educación superior, se ve fomentada la industria básica y a la larga generan más empleos. Las industrias básicas también se ven fomentadas a partir de la inversión en infraestructura, porque la construcción de carreteras, de centros de acopio, plazas de mercadeo y demás obras que faciliten o fomenten la distribución y funcionamiento de las industrias básicas, hacen que estas medidas, a la larga, generen más empleos. Los empleos generados en las industrias básicas son de características especiales, que los hacen muy atractivos para los habitantes de la región, porque les garantizan un ingreso económico estable y suficiente, que satisface sus necesidades, da a los empleados una sensación de bienestar y una confianza en el futuro. Las industrias básicas jalonan la generación de empleos indirectos llamados *actividades inducidas*; en consecuencia, en la medida en que exista mayor número de industrias básicas, existirá un mayor número de empleos en las actividades inducidas. Los empleos generados por el sector de los servicios están relacionados con la población, porque en la medida en que existan más habitantes en la región, mayor será la necesidad de aumentar los empleos que presten servicios a la comunidad y viceversa. Los empleos de la industria de los servicios también se ven aumentados si en la región se invierte en aumentar la planta de personal de los servicios.

El modelo clasifica los empleos en dos categorías: fijos y temporales. Los fijos son plazas de trabajo en donde el único parámetro que lo afecta es la rotación de personal, es decir, puede que las personas que están ocupando el puesto de trabajo cambien, pero el puesto de trabajo se mantiene; además, están contratados por término indefinido o por períodos mayores a un año. Los empleos temporales son puestos de trabajo de carácter temporal (como su nombre lo indica), son empleos que se realizan por el tiempo de ejecución de la obra o de apoyo a alguna actividad particular de manera temporal.

Los sectores anteriormente expuestos determinan el coeficiente de atracción de la región. Este coeficiente se ve incrementado por la generación de empleos en las industrias básicas, por el nivel de inversión per cápita y por la posibilidad de cursar estudios superiores; a su vez, el coeficiente se ve disminuido en la medida en que en la región no existan viviendas suficientes. Este coeficiente de atracción con un retardo afecta las emigraciones en la

región, puesto que si es alto el coeficiente, la gente no emigra y viceversa. Con un retardo mayor, el coeficiente afecta las inmigraciones, puesto que la población que inmigra depende de los medios de comunicación (que en las zonas rurales colombianas son muy deficientes) para informarse si viajan a esta región o evitan ir a ella.

MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático en el cual se fundamenta, está estructurado por ecuaciones con operaciones matemáticas sencillas de adición, sustracción, multiplicación y división; en algunas secciones se crearon condicionales del tipo *if* para evitar valores negativos incoherentes (como viviendas negativas o poblaciones negativas); finalmente, el uso de no linealidades es común (véanse Ecuaciones del modelo) para crear relaciones como las que unen el coeficiente de atracción con las tasas de migración.

El modelo matemático se inicia con el cálculo del valor de los niveles, por ejemplo, el nivel viviendas, que está relacionado con los flujos construcción y demolición, suponiendo que el valor inicial de las viviendas en el municipio fueran 1500 (viviendas en el instante J); el valor del flujo construcción en el instante JK es de 10 y el valor del flujo demolición en el instante JK es de 5; en consecuencia, el valor del nivel (que se calcula por el método de integración numérica de Euler) tiene como fundamento la siguiente ecuación:

$$y_{t+1} = y_t + f(x_t, y_t) * h$$

donde y_{t+1} es el siguiente valor de la función (o el valor de la integral hasta este punto); y_t es el valor actual de la función; $f(x_t, y_t)$ es la ecuación diferencial de primer orden (o para nuestro modelo, ecuación de indiferencia) y h es la distancia entre cada paso de integración, que para nuestro modelo sería dt , *diferencial de tiempo*. En consecuencia, en nuestro caso la integración numérica quedaría:

$$Viviendas_k = 1000 + 0.01 * (5)$$

donde 1000 (dado en unidades de viviendas) es el valor inicial de viviendas en el instante J, 0.01 es el “ancho” de la diferencial de tiempo (medido para el modelo en años) y 5 es la diferencia entre el flujo de entrada y el flujo de salida del nivel, los cuales están expresados en viviendas por año. De esta manera, el valor del nivel de

viviendas para el instante K es igual a 1000.05 viviendas. Nótese que el manejo de unidades debe ser muy riguroso; afortunadamente el software utilizado hace una evaluación integral y permite evaluar constantemente el adecuado manejo de unidades. De acuerdo como fueron incorporados los niveles al modelo, se evalúan el resto de los niveles, y la información es acumulada en una base de datos. Es necesario resaltar que como los retardos o demoras son niveles en “cascada”, éstos son evaluados en este punto (véanse Ecuaciones del modelo).

Luego, con base en la información cargada en los parámetros constantes y de acuerdo con el valor de los niveles, se calculan los flujos en el período KL. Por ejemplo, la tasa construcción de viviendas se calcula:

$$Construcción_{KL} = TC * Viviendas_K$$

TC corresponde a una constante de construcción: es una rata o proporción que indica la “aceleración” que tiene el flujo que es expresado por unidad de tiempo, que multiplicado por el valor del nivel vivienda en el instante K, hace que sus unidades queden expresadas en viviendas por unidad de tiempo. Sin embargo, la operación matemática que contenga un nivel puede ser de cualquier tipo, incluso condicionada. Es decir, si el nivel está dentro de ciertos parámetros, haga una multiplicación; de lo contrario, en todos los otros casos haga una suma. Lo importante es que exista integridad en el manejo de las unidades de medida. El resto de niveles se calculan de acuerdo como fueron ingresados en el modelo.

Posteriormente se calculan todas las variables auxiliares de acuerdo con los valores de los parámetros constantes, el valor de los niveles, y en caso de que el modelo lo determine, los flujos. Las operaciones matemáticas dentro de las variables auxiliares son de diversa índole; por ejemplo, máximos, mínimos, promedios, funciones discontinuas, potencias, logaritmos, funciones trigonométricas, etc. (véase el manual de usuario del programa Vensim PLE). Es necesario destacar dos variables: la función pulso que tiene un valor inicial y cuando alcance la simulación cierto punto, por ejemplo, en los primeros 5 años de la simulación no toma ningún valor pero después de este punto toma un valor definido por el usuario. La otra variable auxiliar son las no linealidades (véase figura 11) en donde el valor de la variable depende del valor de otra, por ejemplo, en el

sector migraciones existe un indicador llamado *coeficiente de atracción* (que simplemente es un multiplicador, es decir multiplica todos los valores que llegan a ella) que toma ciertos valores de acuerdo con el comportamiento del modelo y lo relaciona con las tasa de migración, acorde con una relación de no linealidad de este tipo.

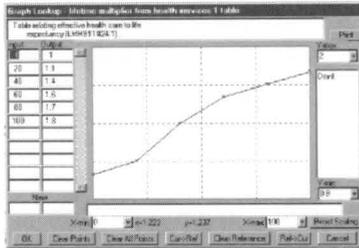


FIGURA 11. No linealidad. (Formato de Vensim PLE).

Ya en este punto, las posiciones de J, K y L se mueven un intervalo de tiempo hacia la derecha y de nuevo comienzan a calcularse en el orden antes expuesto: primero los niveles, luego los flujos y por último las variables auxiliares.

INTERPRETACIÓN DE LA DINÁMICA ACTUAL

El modelo a través del sector población presenta detalles muy interesantes acerca de su dinámica. Como se muestra en la figura 12, la población, a medida que pasa el tiempo, es cada vez menor, y lo que hace que se presente este comportamiento es la excesiva emigración que hay en la región; cabe recordar que la tasa de emigración es un valor que depende del coeficiente de atracción regional, y como éste toma valores bajos, en consecuencia la tasa de emigración es alta. La tasa de emigración anual es del 0.0112, que a pesar de ser un valor muy bajo para una población de menos 10.000 habitantes, hace que exista una salida significativa de personas con respecto al total de la población.

Por otro lado, como se observa en la figura 12 la población por encima de los 60 años es cada vez mayor; adicionalmente se observa que los niños cada vez son más pocos, lo cual tiene múltiples repercusiones para la región en el futuro.

Si esta tendencia continúa, la población va a ser en su mayoría de la tercera edad y habrá que hacer

cambios estructurales en la región, como la de sustituir escuelas (porque no habrá niños para educar) por hospitales geriátricos. Pero como lo anterior es absurdo, se pretende buscar políticas que ayuden a cambiar este panorama sombrío.

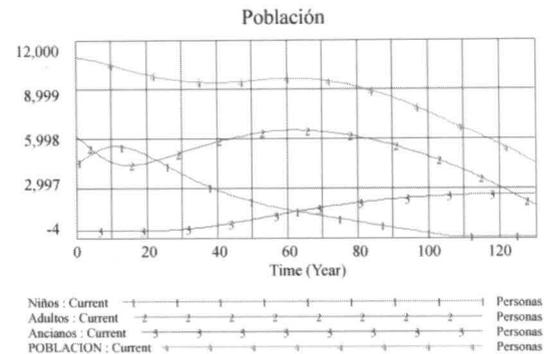


FIGURA 12. Dinámica de la población de Junín, Cundinamarca. El año cero corresponde al año 1973 hasta el año 2100.

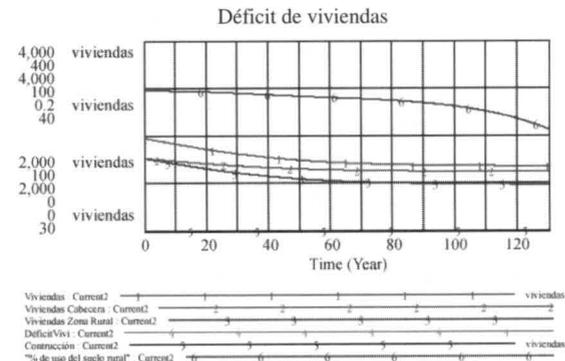


FIGURA 13. Dinámica del sector viviendas del modelo regional aplicado en Junín, Cundinamarca.

Como se muestra en la figura 13, tanto el déficit de viviendas como la construcción de viviendas nunca toman valores diferentes de cero, porque, a pesar de que las viviendas se deterioran, en la región no existe la necesidad de construir viviendas nuevas. Ahora bien, de manera proporcional van disminuyendo tanto las viviendas en el casco urbano como fuera de él, y esto trae como consecuencia directa el que no se requiera (claro está, de no modificarse alguna política que determine lo contrario) espacio para la expansión urbana. Una característica importante es que del total de viviendas en la región, apenas el 7,19% pertenece al casco urbano, lo cual acarrea problemas a la administración municipal para garantizar la adecuada prestación de los servicios públicos, y este porcentaje ha

permanecido constante a lo largo de los 25 años de las que se tienen estadísticas.

Por otro lado, el área total de Junín es de 34.412 hectáreas, de las cuales sólo son utilizadas en un 38%, y con el desarrollo negativo de la región este porcentaje se reduce gradualmente. Esto se ve reflejado en un desaprovechamiento gradual del terreno en la región y, adicionalmente, demuestra que no hay que tratar de colonizar nuevas áreas o utilizar áreas protegidas con el objeto de explotarlo económicamente de alguna manera.

De otra parte, la educación en la región no tiene la cobertura que debería tener como se muestra en la figura 14. Comparando la cantidad de niños con los cupos disponibles para educación básica, resulta insuficiente, hasta el punto de sólo cubrir el 45% de las personas que pudieran estudiar. Esta situación no es sorprendente si se examina que para 1994 en Cundinamarca un total de 171.566 jóvenes y niños, entre los 3 y 18 años, no habían sido incorporados al sistema educativo. De esta cifra, 100.300 correspondían a jóvenes entre los 12 y los 18 años que no tuvieron acceso a la educación secundaria.

Se hace notoria la influencia de la emigración en la educación, ya que la cantidad de personas que cursan cada nivel educativo es menor, lo cual determina la forma que tienen las tendencias de las variables. Por ejemplo, los cupos para educación básica primaria resultan suficientes cuando la cantidad de niños se hace equivalente a la cantidad de cupos disponibles, y en la medida en que disminuye la cantidad de niños, disminuyen también los cupos disponibles (ya que no se necesitan). Esta situación ocurrirá después del año 2043, dado que se tendrán que cerrar escuelas y colegios porque no habrá quienes los usen.

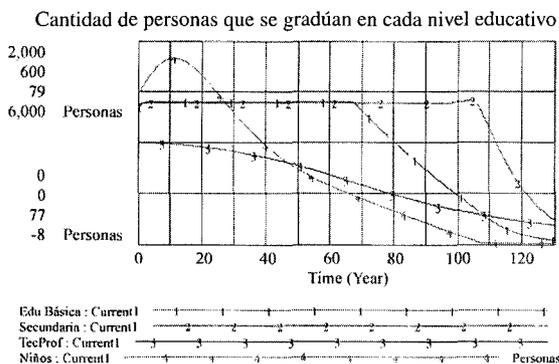


FIGURA 14. Tendencias de la cobertura educativa en la región.

La deserción académica para la educación primaria constituye alrededor del 30%. Éste es un dato aproximado, porque no se llevan estadísticas exactas y confiables sobre este fenómeno en Junín, dato que va a tono con lo presentado en el informe de la Unicef “Estado mundial de la infancia 1999”, para Colombia, en donde hablando de deserción escolar afirma: “El 40 por ciento de niños abandona las aulas antes de terminar su proceso de aprendizaje”. La deserción para la educación secundaria corresponde al 20% de la población estudiantil en la región, aproximadamente; cifra relativamente alta si se tiene en cuenta que la región tiene menos de 10.000 habitantes. Por otro lado, la deserción académica en educación superior está próxima al 25%; este porcentaje corresponde a las personas de la región que están inscritas en programas de educación superior y que no culminan sus estudios.

En el sector laboral se evidencia la contracción en el desarrollo económico de la región. Las causas son difíciles de determinar, pero lo que sí se puede expresar es que obedece a una combinación de causas que restan “atractividad” a la región. En la figura 15 se aprecia cómo cada una de las posibles fuentes de empleos de la región colapsan antes del año 2073, comportamiento que explica por qué el coeficiente de atracción regional toma valores tales que propician la emigración.

Tanto las industrias básicas como las actividades industriales y los servicios en los primeros años entran en una etapa de descenso gradual hasta el año 2053, para posteriormente comenzar a caer abruptamente. Un fenómeno interesante es que la tendencia es muy parecida a la que tienen los adultos en el sector población, lo cual indica que este fenómeno eventualmente puede también ser generado por las migraciones de la población.

Otro comportamiento interesante es el que presenta el indicador de desempleo del modelo, el cual en la última parte cae, insinuando que las condiciones laborales en la región mejorarían, lo cual, como vimos anteriormente no es del todo cierto. Lo que ocurre es que como las personas están emigrando, hay menos gente; las fuentes de empleos establecidos hasta cierto punto creen que la situación puede mejorar, o no seguir empeorando, lo cual obliga a mantener los empleos. Pero el ritmo al cual disminuye la población no es el mismo al que se reducen los empleos, lo cual da la sensación de que el desempleo disminuye. En conclu-

sión, el desempleo no se reduce, sino que no hay gente para trabajar y los pocos puestos de empleos que quedan están siempre ocupados.

Por otro lado, el coeficiente de atracción de la región no aumenta lo suficiente como para influir fuertemente en las migraciones para evitar el que las personas se marchen y quede despoblada la región. En la figura 16 se muestran las tendencias del sector migraciones; cabe aclarar que las escalas fueron cambiadas para poder observar adecuadamente cada uno de los patrones. En ella se ilustra cómo el modelo trabaja adecuadamente cada una de las tasas de migración; por ejemplo, cuando el coeficiente de atracción toma valores altos, las inmigraciones aumentan y las emigraciones se disminuyen (pero infortunadamente no en la proporción que se requiere).

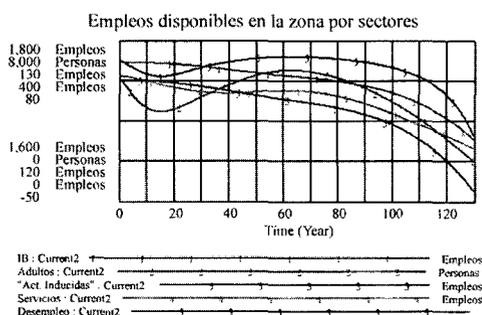


FIGURA 15. Tendencias del sector empleos en el modelo regional de Junín, Cundinamarca.

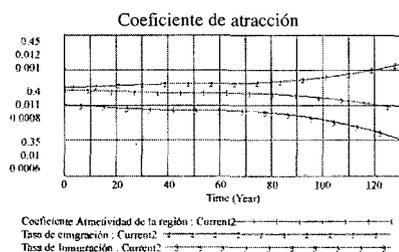


FIGURA 16. Tendencias del sector migraciones del modelo regional de Junín, Cundinamarca.

Como se presentó anteriormente, el panorama puede tornarse algo sombrío, pero el modelo no es para hacer predicciones cabalísticas, sino para poder experimentar políticas que ayuden a la reactivación económica de la región y, por tanto, que aumenten la "atractividad" de la región. Para esto se diseñaron varios escenarios tendentes a determinar cuáles son las mejores medidas o las mejores estrategias, para reactivar la economía de la región y disminuir la emigración que ella sufre.

El primero consiste en el escenario inicial que fue explicado en la sección anterior. En el segundo escenario, se hace una inversión fija de cincuenta millones de pesos cada año de por vida, adicional a lo que actualmente se invierte; inicialmente se destinan todos al sector educación, haciendo claridad que éstos se invierten en forma equitativa entre educación básica, secundaria y superior. Como resultado, se genera un aumento no muy significativo del coeficiente de "atractividad", pero que detiene (aunque no la hace desaparecer) la emigración que sufre la región.

El tercer escenario corresponde al efecto que tendría el adoptar una política de hacer una inversión fija anual de por vida en el mejoramiento de la infraestructura de la región para las industrias básicas. Cabe aclarar que esta inversión se considera una inversión efectiva, es decir, que se invirtió en algo que en realidad tuvo un efecto favorecedor para las industrias básicas. El efecto de esta política de inversión hace que se promueva la creación de nuevos empleos fijos, empleos que sí generan retención de la población, ya que garantizan la satisfacción de las necesidades y expectativas de los habitantes.

El cuarto escenario corresponde al efecto de invertir un monto fijo anual de por vida en el sector servicios, lo cual se ve reflejado en un mayor número de médicos, odontólogos, profesores, personal de mantenimiento de las redes de servicios públicos, etc. El efecto presenta el mismo patrón de los anteriores.

El quinto escenario tiene que ver con la política de invertir una cantidad fija de por vida distribuida equitativamente en las tres posibles opciones de inversión; es decir, a cada uno corresponde el 33,33%. El cual tiene un efecto con el mismo patrón anterior.

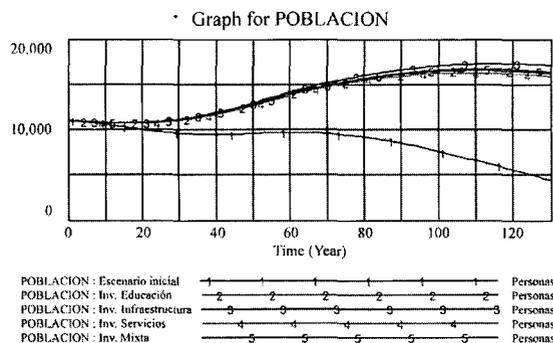


FIGURA 17. Resultados de fijar una política de inversión fija anualmente, reflejado en la reducción de la emigración.

Comparando los cinco escenarios, el que tiene un mayor impacto es la inversión en infraestructura, puesto que de manera más rápida aumenta el coeficiente de atracción de la región. Por otro lado, aparte de la política por omisión (de no hacer nada y dejar las cosas como están), la que menos impacto tiene en el crecimiento del coeficiente de atracción de la región es la de invertir en el aumento de los servicios para la comunidad. No porque sea inconveniente, sino porque es la que genera menos sinergia en el sistema.

Las ventajas de usar este modelo de simulación es su capacidad para observar el impacto en otros sectores del modelo; por ejemplo, como el coeficiente de "atractividad" crece, también lo hace la cantidad de personas que se encuentran en la comunidad, generando un mayor déficit de vivienda.

Otro aspecto para destacar de estos escenarios de inversión es el comportamiento del coeficiente de atracción. En la figura 18 se muestra que el hecho de invertir hace que se aumente el coeficiente de atracción, volviendo más interesante la región para sus habitantes.

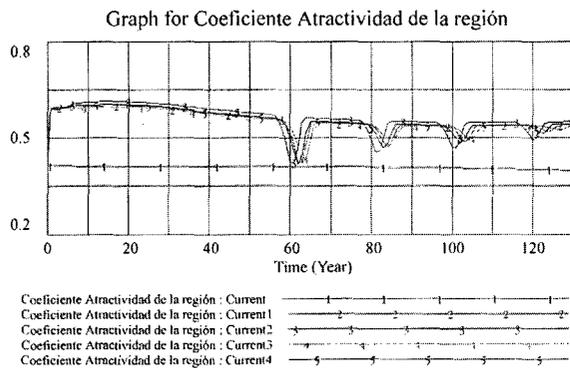


FIGURA 18. Patrones de comportamiento del coeficiente de atracción regional, en varios escenarios de simulación.

Los picos corresponden a la merma que sufre el coeficiente cuando se presenta el déficit de vivienda, porque como crece la población, las viviendas disponibles disminuyen y se deben comenzar a construir nue-

vas. El coeficiente vuelve a tomar su valor cuando el déficit ya es suplido. También es interesante observar cómo el coeficiente de atracción disminuye, ya que la inversión de algún modo va dejando de ser una razón atractiva para la región.

CONCLUSIÓN

Los modelos de simulación son una de las tecnologías puestas al servicio de la humanidad. Ha sido el resultado, como es apenas evidente, del trabajo mancomunado de diversas áreas del conocimiento como son las ingenierías, la matemática, la estadística, el pensamiento sistémico, entre otras. Han sido aplicados a una gran variedad de situaciones, pero su difusión se ha visto limitada a un grupo pequeño de usuarios con los conocimientos y los recursos para elaborarlas.

La dinámica de sistemas es un mecanismo de simulación que no sólo permite modelar y simular situaciones de complejidad diversa, sino que además es una técnica muy económica que puede ser aplicada en computadores de muy modesta capacidad (con procesadores 486 y superiores) de acuerdo con el software que se elija. Alguno de estos softwares son de distribución gratuita y admiten el desarrollo de modelos de manera casi intuitiva y agradable para el usuario. La mayoría de los softwares de simulación están diseñados con propósitos muy específicos, como simular líneas de ensamble o líneas de espera; en dinámica de sistemas se puede simular una gran variedad de situaciones de diversa índole brindando gran versatilidad.

Con estas características, los modelos de simulación continuos pueden, desde la ingeniería industrial, no sólo mejorar procesos en el sector público y privado, sino además contar con herramientas que facilitan demostrar a las personas que toman decisiones y a los que elaboran políticas, la conveniencia o inconveniencia de su accionar, reduciendo por ende el riesgo innato a estas situaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Aracil, Javier, *Introducción a la dinámica de sistemas*, Alianza Editorial, 1992.
- Arsham, Hossein, *Systems Simulation: The Shortest Path from Learning to Applications*, URL for the main site is: <http://ubmail.ubalt.edu/~harsham/simulation/sim.htm> 2000.
- Barjis, Joseph y Joaquim Filipe, *Simulation of organizational processes combining semantic analysis and petri nets*. 2000 Summer Computer Simulation Conference. URL for the main site is: [HTTP://web1.affinitycity.com/affinityfunctions/reports/reports.asp?ACTable=Table5&search_name=scsc2000&sortBy=5&searchby=5&DisplayBy=BookListing2](http://web1.affinitycity.com/affinityfunctions/reports/reports.asp?ACTable=Table5&search_name=scsc2000&sortBy=5&searchby=5&DisplayBy=BookListing2)
- Chapra, Steven y Raymond Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*. México: McGraw-Hill, 1988.
- Departamento Nacional de Estadística, DANE, Censo nacional de población y vivienda 1973, 1985 y 1993.
- Dyner, Isaac, *Dinámica de sistemas y simulación continua en procesos de planificación*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1993.
- Forrester, Jay W., *Industrial Dynamics*. MIT Press, 1961.
- _____, *Principles of systems*. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press Inc., 1976.
- _____, *Urban Dynamics*. MIT Press, 1969.
- Garavito, Luis, *Aproximación al modelo de la dinámica rural colombiana*, Universidad de los Andes, 1998.
- Gordon, Steven C., *Determining the value of simulation*. 2000 Summer Computer Simulation Conference. URL for the main site is: [HTTP://web1.affinitycity.com/affinityfunctions/reports/reports.asp?ACTable=Table5&search_name=scsc2000&sortBy=5&searchby=5&DisplayBy=BookListing2](http://web1.affinitycity.com/affinityfunctions/reports/reports.asp?ACTable=Table5&search_name=scsc2000&sortBy=5&searchby=5&DisplayBy=BookListing2)
- Grupo SIMON de investigación, *Evolución 2.0. Manual del usuario*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1995.
- Hamilton, H. R., *Systems simulation for regional analysis. An application to River-Basin planning*. MIT Press, 1969.
- Hanneman, R. and S. Patrick, *On the Uses of Computer-Assisted Simulation Modelling in the Social Sciences 1997*, Sociological Research Online, vol. 2, No. 2, URL for the main site is: <http://www.socresonline.org.uk/socresonline/2/2/5.html>
- Martínez, Silvio, *Simulación dinámica por ordenador*. Madrid: Alianza Editorial, 1988.
- Prawda Witenberg, Juan, *Métodos y modelos de investigación de operaciones*, vol. 2, Modelos estocásticos. México: Limusa, 1995.
- Senge, Peter M., *La quinta disciplina*, Barcelona: Granica, 1995.
- Sitompul, Rislina y Mamad Tasrif, *A systems dynamics view of rural community development in Indonesia*. Bandung, 1997.
- Tucker, William V., Bruce Fairchild y David Gross. *Simulationist: What does industry want?*, The Boeing Company, 2000 Summer Computer Simulation Conference. URL for the main site is: [HTTP://web1.affinitycity.com/affinityfunctions/reports/reports.asp?ACTable=Table5&search_name=scsc2000&sortBy=5&searchby=5&DisplayBy=BookListing2](http://web1.affinitycity.com/affinityfunctions/reports/reports.asp?ACTable=Table5&search_name=scsc2000&sortBy=5&searchby=5&DisplayBy=BookListing2)
- Ventana Systems. Vensim, Personal Learning Edition PLE, User's Guide Version 3.0, USA, 1998.
- Ziad K., Shawwash y Denis Russell, *Use of system dynamics for managing Water in Jordan*, Vancouver, 1997.