

INVESTIGACIONES

ITINERARIOS FLEXIBLES DE EXPLORACION DE MODELOS EN BASE DE BUCLES DE RETROALIMENTACION – EL CASO DE MACROLAB

Flexible model exploration paths based on feedback loops – the case of MacroLab

Martin Schaffernicht

Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad de Talca, Avenida Lircay s/n, Talca, Chile;
martin@utalca.cl

Resumen

Un modelo de dinámica de sistemas tiene múltiples bucles de retroalimentación. Posiblemente se puede explorar desde cualquier variable, ya que los bucles hacen recorrer el modelo entero. Esto podría permitir el diseño de actividades de aprendizaje diversificados, garantizando que se aprende lo mismo. Lo anterior se intentó con el modelo macroeconómico MacroLab. Los resultados de la evaluación de los modelos mentales de los sujetos sugieren que es posible. Pero el método usual de comparación de modelos mentales basado en la *razón de distancia* es inadecuado. Se muestra cómo el análisis de los bucles permite diseñar actividades de exploración que aseguren la cobertura de ciertas variables, independiente del escenario de *shock*. Se derivan características de un método general de comparación de modelos mentales para la dinámica de sistemas. Las conclusiones son preliminares e indican los pasos futuros de esta línea de investigación.

Palabras clave: exploración de modelos, modelos mentales, comparación de modelos mentales, bucles de retroalimentación.

Abstract

A system dynamics model consists of feedback loops. So possibly, for exploring such a model, it is not important with which variable one starts, since the loops make one go through the entire model. Thus multiple exploration itineraries might be defined such as to allow flexible work by students, while they still explore the same variables and links. This paper reports from an attempt to do this with the MacroLab macroeconomical model. Los results of an assessment of students' mental models suggest that in principle this may be possible. However, the usual comparison methods based on the *distance ratio* are inappropriate. It is shown how loops can be used to design exploration activities, and indications for a generic method for comparing mental models based on system dynamics models. The conclusions are preliminary and lines for future research are defined.

Key words: model exploration, mental models, mental model comparison, feedback loops.

INTRODUCCION

La enseñanza de la macroeconomía se basa en libros docentes cuyo contenido ha sido tradicionalmente conformado por texto, luego ecuaciones para representar las condiciones de equilibrio de las mayores variables y finalmente gráficos que representan los lugares geométricos de los puntos de equilibrio de ciertas variables. En otros lugares se ha criticado este enfoque, argumentando en favor de herramientas complementarias capaces de agregar el componente dinámico que es necesario para enfocar la mente en los procesos económicos (Wheat, 2007a, 2007b). Los modelos de simulación de dinámica de sistemas, en conjunto con interfaces de juego para interactuar con el modelo durante su ejecución, son una de estas herramientas. En el caso de la macroeconomía, MacroLab es el más difundido de estos ambientes¹.

Los libros son un medio de representación lineal: se redactan y se leen en una determinada secuencia. Si bien las tablas de contenido, los índices alfabéticos y las referencias cruzadas permiten en principio la elección de otros itinerarios, la gran mayoría de lectores procede de forma lineal. En parte, esto es usado por los autores para conducir al lector por una progresión, desde la introducción y una presentación general hacia las partes más detalladas y difíciles. Otro aspecto es que, dada la subdivisión de la economía en diferentes mercados, se comienza discutiendo uno, luego el siguiente y así consecutivamente. El lector no tiene mucha elección en cuanto al itinerario.

Los simuladores basados en modelos de dinámica de sistemas permiten un abordaje diferente. Se basan en bucles de retroalimentación y éstos atraviesan diferentes mercados pasando por encima de estas delimitaciones. Por lo tanto, el usuario que analiza tal modelo puede “entrar” en el sistema donde quiera: siempre los bucles lo guiarán a través de todos los mercados relevantes. Dos posibilidades ventajosas son la posibilidad de progresar según muy diferentes itinerarios y la conservación del carácter sistémico de la economía. La disponibilidad de MacroLab hizo surgir la sospecha de que esta herramienta permite actividades de estudio mucho más flexibles y personalizables que los tradicionales libros de texto, sin sacrificar cobertura en términos de las variables principales de la macroeconomía.

Este artículo se enfoca en la primera ventaja posible y responde a la necesidad de comprobar hasta qué grado ésta se realiza y de qué factores este grado depende. Se plantea la pregunta si los estudiantes que enfocan la macroeconomía desde diversos puntos de entrada llegan a elaborar representaciones mentales que cubran el espacio de las variables macroeconómicas importantes.

Aquí se reporta de un estudio de exploración, en el cual se partió usando un método de comparación de modelos mentales para descubrir si los modelos mentales de estudiantes son similares o diferentes, después de haber estudiado distintos escenarios de *shock* en el modelo del MacroLab. La siguiente sección presenta la metodología. Posteriormente se relatan los hallazgos: se encontró bastante similitud, pero también diferencias. Puesto que estas diferencias no son explicables con el método de comparación usado, sigue una amplia sección de discusión en la cual se muestra cómo los bucles de retroalimentación no solamente explican las diferencias, sino que también permiten indicar un método de

¹ El autor agradece a David Wheat por su buena disposición y colaboración durante el proceso de trabajo.

diseño instruccional que evita las diferencias indeseadas entre los estudiantes. Finalmente, las conclusiones ofrecen una visión de los pasos futuros en esta temática.

METODOLOGIA

Objetivos e hipótesis inicial

La pregunta de investigación fue:

Los estudiantes que abordan un modelo de macroeconomía desde diferentes puntos de entrada, ¿aprenden sobre las mismas variables y conexiones causales entre ellos y en relación con los libros docentes?

Esta pregunta comporta implícitamente la expectativa que esto sea el caso, lo que motiva el objetivo de este estudio: aportar elementos de respuesta para poder sugerir un primer juicio sobre la hipótesis.

Se eligió el ambiente de aprendizaje MacroLab (Wheat, 2007b) como modelo de referencia. Se entiende “lo que aprenden” como “modelos mentales”, constructo que tiene una definición en psicología y en la dinámica de sistemas, y para el cual existen métodos de comparación. Dentro de este contexto, se definió un proceso para el estudio.

MacroLab

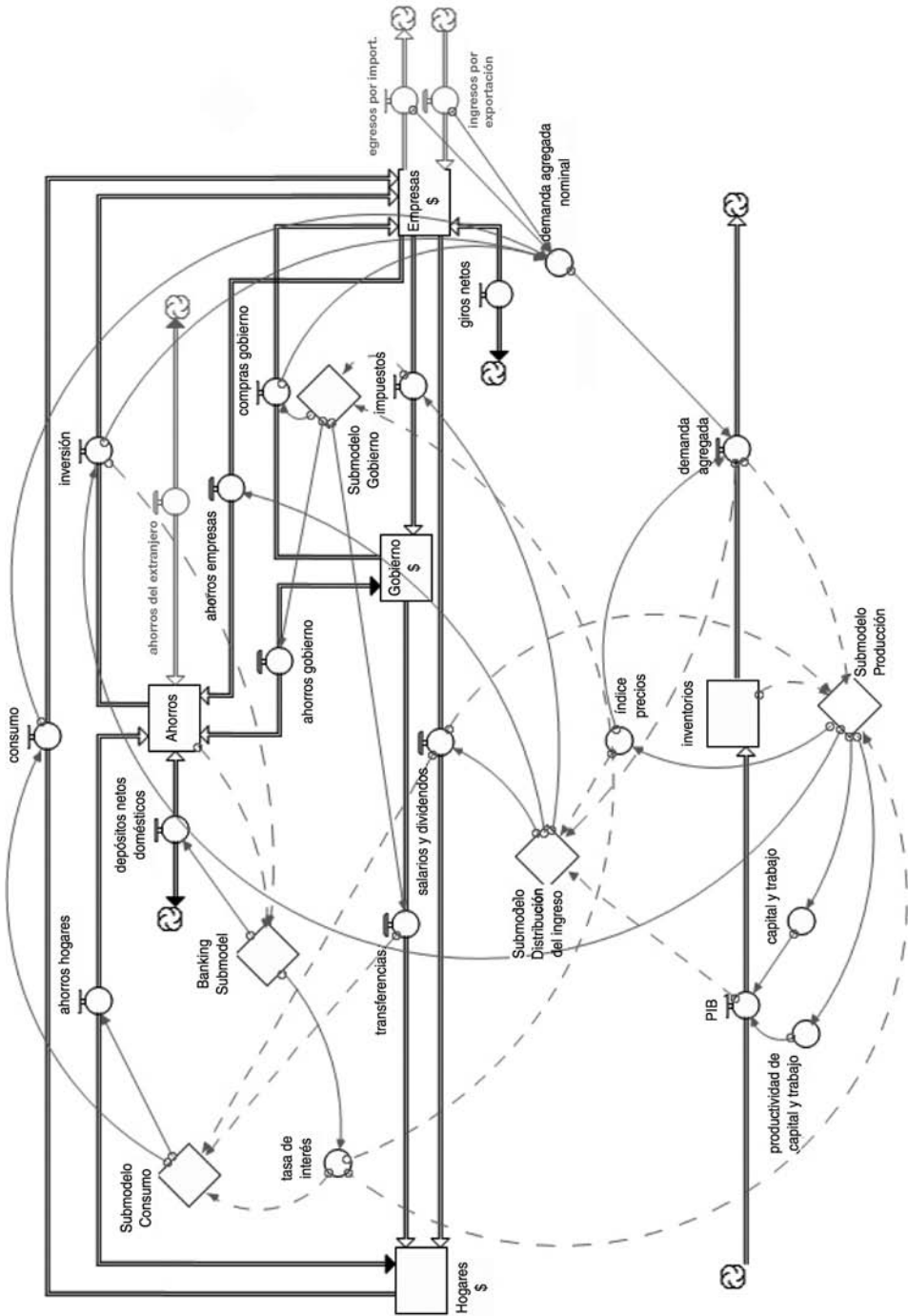
MacroLab es un ambiente de aprendizaje interactivo basado en un modelo de simulación de una economía abierta (Wheat, 2007). Aquí nos enfocamos en el modelo de simulación, que consiste de un sector principal y un conjunto de sectores; la noción de “sector” es propia a los software “STELLA/iThink” y permite organizar las variables de un modelo en bloques distintos.

El sector principal contiene dos grandes sistemas de flujos y acumulaciones que representan los dos aspectos principales de la economía de un país: el circuito del dinero y los bienes y productos (como unidades físicas). Es una vista muy general, en la cual todos los detalles de los procesos que condicionan los flujos están escondidos en submodelos/sectores.

El dinero circula entre diferentes puntos de acumulación (rectángulos): el gobierno hace transferencias a los hogares que por consumo pagan a las empresas, que a su vez pagan impuestos al gobierno. En el caso del bien, la producción aumenta los inventarios y la demanda agregada los reduce. En esta ilustración aparece un conjunto de rombos que representan a los diferentes “sectores”: Banca (Política monetaria y Tasas de interés), Consumo, Distribución del ingreso, Gobierno, Producción (Precios, Trabajo, Capital y Productividad) y Tipo de cambio. El modelo entero comporta unas 250 variables para el país (EE.UU.) y la misma cantidad para el “resto del mundo” y ha sido descrito en detalle en otra publicación (Wheat, 2007; vea http://dinamicasistemas.utralca.cl/5_Educacion/MacroLab/MacroLab.html).

Para nuestros fines, es importante señalar que el modelo permite formular múltiples escenarios de *shock* y analizar los efectos; también que se pueden derivar diagramas de

Figura 1
 El sector principal del modelo de MacroLab



bucle causal (DBC). Estos diagramas representan variables y vínculos (como cualquier diagrama causal) y además señalan los bucles con su respectiva polaridad; son una simplificación de los modelos de simulación que dirigen la atención hacia los bucles de retroalimentación (Lane, 2008).

No obstante la tradición de la dinámica de sistemas, la siguiente figura muestra un “diagrama causal” de una simplificación del modelo de simulación MacroLab (sin las variables que no correspondan a las discutidas en los textos docentes de macroeconomía y las que no son necesarias para unir diferentes bucles de retroalimentación), que consiste de 82 variables. Más adelante se discute este aspecto en profundidad.

Modelos mentales y razón de distancia

Los modelos mentales se utilizan en la ciencia cognitiva en muchos dominios de razonamiento (Johnson-Leird, 1999). En dinámica de sistemas, la noción “modelo mental” ha jugado un papel importante desde el inicio, refiriéndose al conocimiento que una persona tiene de una situación o problema dinámico. La definición comúnmente usada se debe a Doyle y Ford (1998, 1999; Lane, 1999):

“una representación conceptual interna relativamente duradera y accesible, pero limitada de un sistema externo (histórico, existente o proyectado) cuya estructura es análoga a la estructura percibida de aquel sistema” (trad. por autor).

Si bien esta definición no menciona la manera de representar un modelo mental, la manera predominante para los psicólogos es el diagrama causal, que consiste de variables y vínculos causales –muy similar a los diagramas de bucle causal empleados en dinámica de sistemas (Schaffernicht, 2007).

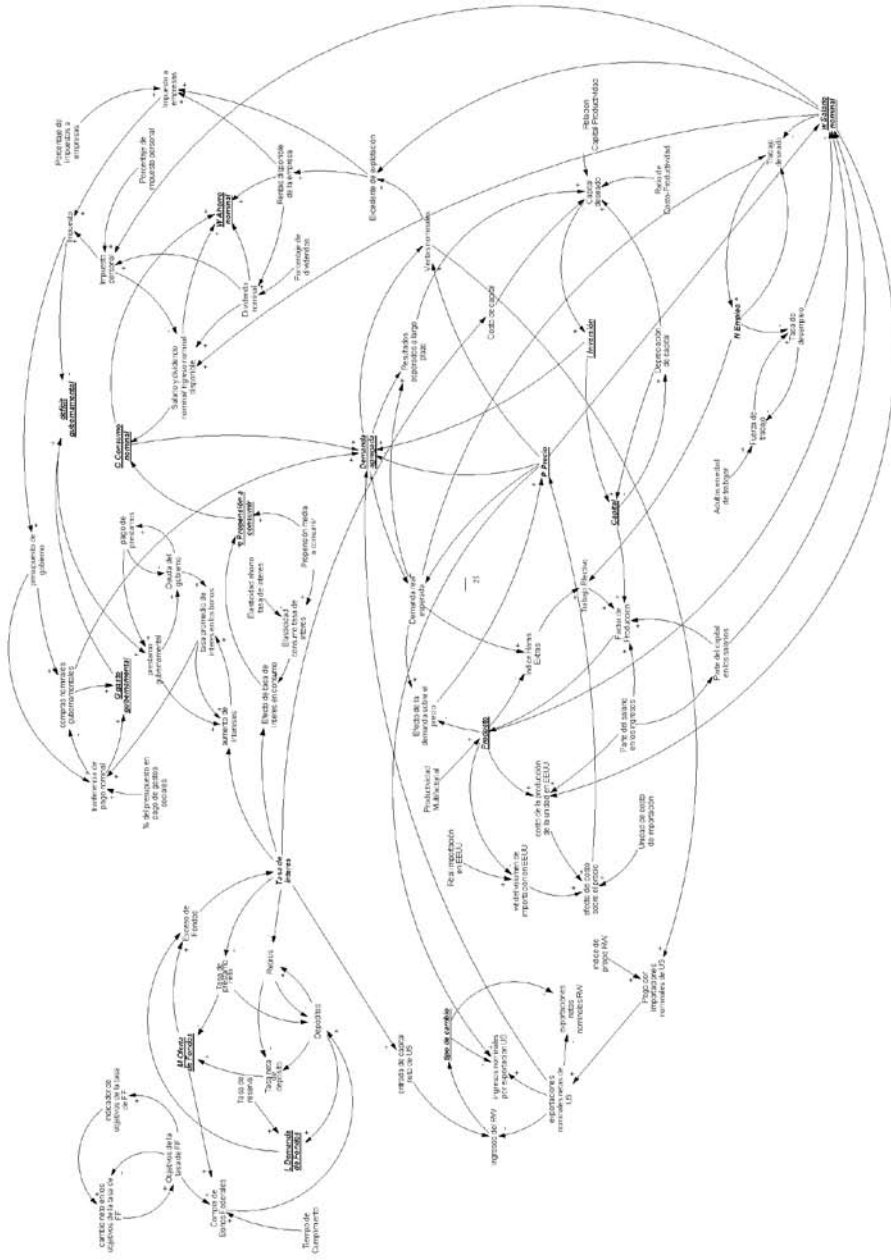
Dentro de la literatura de dinámica de sistemas hubo pocos intentos de comparación sistemática de modelos (Schaffernicht, 2006); sin embargo, la literatura de modelos mentales sí cuenta con una línea de trabajos acerca de la comparación de modelos mentales. Específicamente, se ha ido perfilando un método de “razón de distancia” o RD (“*distance ratio*” en inglés; Langfield-Smith *et al.*, 1992; Markóvski y Goldberg, 1995). Dado que hemos elegido este método para el presente trabajo, será presentado aquí conceptualmente.

Este método pregunta por la distancia entre dos modelos mentales, lo que lo hace diferente y qué tan importante es. La distancia se expresa en forma de una razón entre 0 (modelos idénticos) y 1 (modelos 100% diferentes). Para proceder, se basa en diagramas causales con variables y vínculos causales. Los vínculos pueden ser de polaridad positiva o negativa y poseer una fuerza (usualmente entre -3 y 3; recordemos que se trata de modelos cualitativos).

Cada tal diagrama se puede convertir en matriz de asociaciones, donde las variables se colocan cómo rótulo de fila y de columna. Luego de tener a dos modelos mentales en la forma matricial, se convierte en matriz extendida: a cada una se le insertan las variables de la respectiva otra matriz, para asegurar que la comparación se haga entre dos conjuntos idénticos de variables. Llamaremos las dos matrices *A* y *B*.

Las filas serán numeradas del 1 al *p* usando un índice *i*; las columnas a partir del 1 de *p* utilizando el índice *j*. A cada variable se le asigna una fila y columna con un

Figura 2
 Diagrama causal simplificado de MacroLab



número específico e $i = j$. Si las variables x e y se encuentran en la fila r y la columna c , respectivamente, los posibles vínculos entre ellos aparecerán en las celdas de a_{rc} y b_{rc} . Un vínculo de una variable x a una variable y se caracterizan como "1" para la polaridad positiva y "-1" para polaridad negativa; "0" significa "ninguna relación". Por lo tanto, si $a_{rc} = 1$ y $b_{rc} = -1$, significa que en el modelo A , hay un vínculo positivo de x a y , mientras que en el modelo B en el enlace de x a y es negativo.

El número total de nodos posibles es denotado por p ; P_c es el conjunto de nodos comunes a A y B , y el p_c es el número de nodos. P_{uA} es el número de nodos que están únicamente en A y P_{uB} el número de nodos únicamente en B . N_A y N_B son los conjuntos de nodos en los dos modelos.

La fórmula completa de la RD es entonces:

$$DR(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p diff(i, j)}{(\epsilon\beta + \delta)p_c^2 + \gamma'(2p_c(p_{uA} + p_{uB}) + p_{uA}^2 + p_{uB}^2) - \alpha((\epsilon\beta + \delta)p_c + \gamma'(p_{uA} + p_{uB}))}$$

$diff(i, j) =$

- 0 si $i = j$ y $\alpha = 1$;
- $\Gamma(a_{ij}, b_{ij})$ si i o $j \notin P_c$ y $i, j \in N_A$ o $i, j \in N_B$;
- $|a_{ij} - b_{ij}| + \delta$ si $a_{ij} * b_{ij} < 0$;
- $|a_{ij} - b_{ij}|$ otros casos.

$\Gamma(a_{ij}, b_{ij}) =$

- 0 si $\gamma = 0$;
- 0 si $\gamma = 1$ y $a_{ij} = b_{ij} = 0$
- 1 otros casos.

$\gamma' =$

- 0 if $\gamma = 0$;
- 1 otros casos.

El parámetro β representa la mayor fuerza posible de los vínculos, que es de 1 en nuestro caso, por lo que β se sustituye por 1. De ello se deduce que δ –que daría importancia a los diferentes cambios de polaridad en función de la fortaleza de los vínculos que participan– se pone a 0 (con lo que no se añadirá a la diferencia). Puesto que no estamos interesados en el análisis de modelos de una variable que influye a sí misma directamente (un "auto-loop"), $\alpha = 1$. El parámetro ϵ es el número de posibles polaridades, que debe ser de 2 en nuestro caso. El último parámetro, γ , es un poco más complicado. En dos modelos, un posible vínculo puede estar ausente debido a que el sujeto cree que no hay ningún vínculo causal entre las dos variables, o una (o ambas) de las variables no son parte del modelo. Si esto se entiende como algo diferente, entonces $\gamma = 2$, que es nuestro caso. Usando los valores elegidos en los parámetros, la ecuación se transforma en

$$DR(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \text{diff}(i, j)}{2p_c^2 + 1(2p_c(p_{uA} + p_{uB}) + p_{uA}^2 + p_{uB}^2) - (2p_c + 2(p_{uA} + p_{uB}))}$$

La suma de las diferencias entre las matrices se pone en relación con el tamaño del modelo, en términos de variables y vínculos. Este método ha sido ampliamente utilizado para comparar modelos mentales. Dado que se tienen en cuenta las variables y vínculos causales con polaridad positiva o negativa, puede en principio ser utilizado para comparar modelos mentales en dinámica de sistemas. Es la forma en la cual hemos analizado los modelos de los estudiantes en este caso (Quiroz y Aravena, 2008).

Proceso de estudio

Este estudio acompañó un curso de tercer año de la carrera “ingeniería informática empresarial” en la Universidad de Talca, en el cual se combina la dinámica de sistemas con la macroeconomía. En una primera fase se estudian modelos predefinidos, desde un simple flujo con un acumulador hasta el caso de la inestabilidad en un sistema de producción presentado en el capítulo 4 del texto docente de Morecroft (2007). De esta forma, los estudiantes se acostumbran a explorar la conducta de un modelo, de elaborar diagramas de bucle causal de él y de interpretar lo observado.

Para la fase “MacroLab”, se forman 10 grupos de alumnos –uno por sector. La primera actividad es estudiar la estructura y la conducta del sector de cada grupo de manera aislada. Esto reduce la complejidad del modelo entero a una pequeña porción. Cada grupo elabora un DBC de “su” sector.

Luego se ensamblan los DBC de sector para conformar un DBC de referencia, lo que plantea la necesidad de conectar los DBC de sector, y surgen los bucles de retroalimentación trans-sector.

Finalmente, se define un escenario de *shock* para cada grupo, que ocurre en una de las variables de “su” sector. El encargo es de explorar la manera en la que este *shock* impacta a las variables “producción” y “tasa de desempleo”. Es así que cada grupo parte desde una variable distinta, pero todos deben llegar a comprender los efectos en las mismas dos variables. Parte de este trabajo es la identificación de los bucles relevantes para los efectos directos e indirectos de cada *shock*. Se elabora un DBC propio a cada escenario. Trabajaron los siguientes *shocks*:

Tabla 1

Sectores y *shocks*

Sector	<i>Shock</i>
Trabajo	Aumento población de 30M
Capital	Terremoto destruye capital
Productividad	Innovación aumenta productividad multifactor

Sector	Shock
Precio	Aumento del costo importación
Distribución del ingreso	Baja impuestos a personas a la mitad.
Consumo	Propensidad a consumir aumenta
Gobierno	Aumento del presupuesto fiscal de 2 a 7 años
Dinero	Nuevas reservas en el mercado monetario.
Política monetaria	Shock de DA causa inflación; análisis de dos políticas monetarias
Tasa de cambio	Baja oferta de moneda.

Asumimos que el DBC elaborado por cada grupo es una aproximación al modelo. Dado que todos se basan en el mismo modelo de MacroLab, no hay delicadas situaciones de extracción de conocimientos: el conjunto de variables y de vínculos causales claramente definido. Un grupo de estudiantes memoristas recogió los DBC de los diferentes grupos y el DBC de referencia. Luego los interpretó como “diagramas causales” (sin los bucles) y aplicó el cálculo de la Razón de Distancia a cada uno de los modelos (Quiroz y Aravena, 2008).

RESULTADOS DE LA EXPLORACION

LA MUESTRA

El estudio se ha hecho con un curso de 26 estudiantes. Hubo un grupo por sector:

Tabla 2

Los shocks y sus respectivos sectores

Submodelo	Sector	Estudiantes
Producción	Trabajo	3
	Capital	3
	Productividad	2
	Precio	3
Distribución del ingreso		3
Consumo		2
Gobierno		3
Banca	Dinero	2
	Política monetaria	2
Tasa de cambio		3

Distancia respecto del modelo de referencia

Los resultados están resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 3

Razón de Distancia entre modelos de grupo y modelo de referencia

Submodelo	Sector	RD (%)	VARIABLES	% variables
Producción	Trabajo	3,74	21	26
	Capital	3,62	15	19
	Productividad	3,75	9	11
	Precio	3,82	17	21
Distribución del ingreso		3,05	17	21
Consumo		3,75	19	23
Gobierno		3,59	21	26
Banca	Dinero	–		
	Política monetaria	4,12	17	21
Tasa de cambio		–		

Dos de los modelos grupales no se terminaron a tiempo, por lo cual fueron dejados fuera del análisis. A primera vista, la Razón de Distancia es pequeña en todos los casos, ya que 3% a 4% de diferencia es poco. En este sentido, queda claro que todos los modelos de grupo están bien enmarcados en el modelo de referencia. Se puede interpretar que los grupos han sido capaces de leer bien el modelo de simulación y de no inventar nuevas variables y/o vínculos causales.

Sin embargo, también llama la atención que el porcentaje de las variables usadas –entre 11% y 26%– también es bajo. Ello significa que los diferentes grupos tomaron en cuenta una parte reducida del modelo entero para analizar sus respectivos escenarios de *shock*. Surge la pregunta de si estas partes-del-modelo fueron más bien similares entre los grupos o no.

Distancias entre grupos

En general, los modelos de grupo han sido bastante similares: con RD desde 6% hasta 18%, podemos inferir que la mayor parte de las variables y de los vínculos han sido idénticos. No obstante, el tamaño de los modelos de grupo es reducido, así que una diferencia de 15% significa que entre dos modelos de 20 variables cada uno, existen 3 a 4 diferencias.

Resulta inconveniente que la naturaleza compacta de la RD esconde mucha información interesante cuando se busca entender las diferencias. Surgieron dos preguntas nuevas:

- ¿cómo fue la cobertura de las variables macroeconómicas por los modelos de grupo?
- ¿cómo fue la cobertura del modelo de referencia por los modelos de grupo?

Cobertura del modelo de referencia

Los libros docentes de macroeconomía tratan de forma privilegiada un cierto conjunto de variables, que también forman parte del modelo de MacroLab. Sobre los modelos de grupo analizados se han observado las siguientes tasas de cobertura (porcentaje de los modelos de grupo que incluyen la variable en cuestión):

Tabla 4

Cobertura de las variables principales

Variable	Abreviación usual	Cobertura (%)
Empleo	N	100,00
Producto	Y ^S	100,00
Tasa de desempleo		100,00
Demanda Agregada	Y ^D	87,50
Salario nominal	W	87,50
Precio (nominal)	P	62,50
Tasa de interés	i	50,00
Consumo nominal	C	37,50
Inversión	I	37,50
Ahorro nominal	W	37,50
Propensión a consumir	c	25,00
Capital	K	25,00
Demanda de Reservas	L	25,00
Oferta de Reservas	M	25,00
Déficit Gubernamental		12,50
Gasto Gubernamental	G	12,50
Tipo de Cambio		12,50
Exportaciones	Ex	0,00

No debe sorprender que el empleo, la tasa de desempleo y el producto hayan estado en cada uno de los modelos grupales: fue parte de las tareas asignadas mostrar y explicar

su conducta. La decreciente importancia de las otras variables significa que, con excepción de la demanda agregada, del salario nominal, del (nivel de) precio y de la tasa de interés, las otras variables tienen una importancia reducida. Se deduce de este hecho que algunos de los *shocks* activan solamente una parte de la estructura causal del MacroLab, lo que llama a reflexionar sobre su calidad como actividad de aprendizaje.

Una traza de ello se hace visible en la siguiente tabla, que representa la cantidad de variables principales y su cobertura (porcentaje de todas las variables principales) para cada uno de los escenarios de *shock*:

Tabla 5

Cobertura de variables principales por *shock*

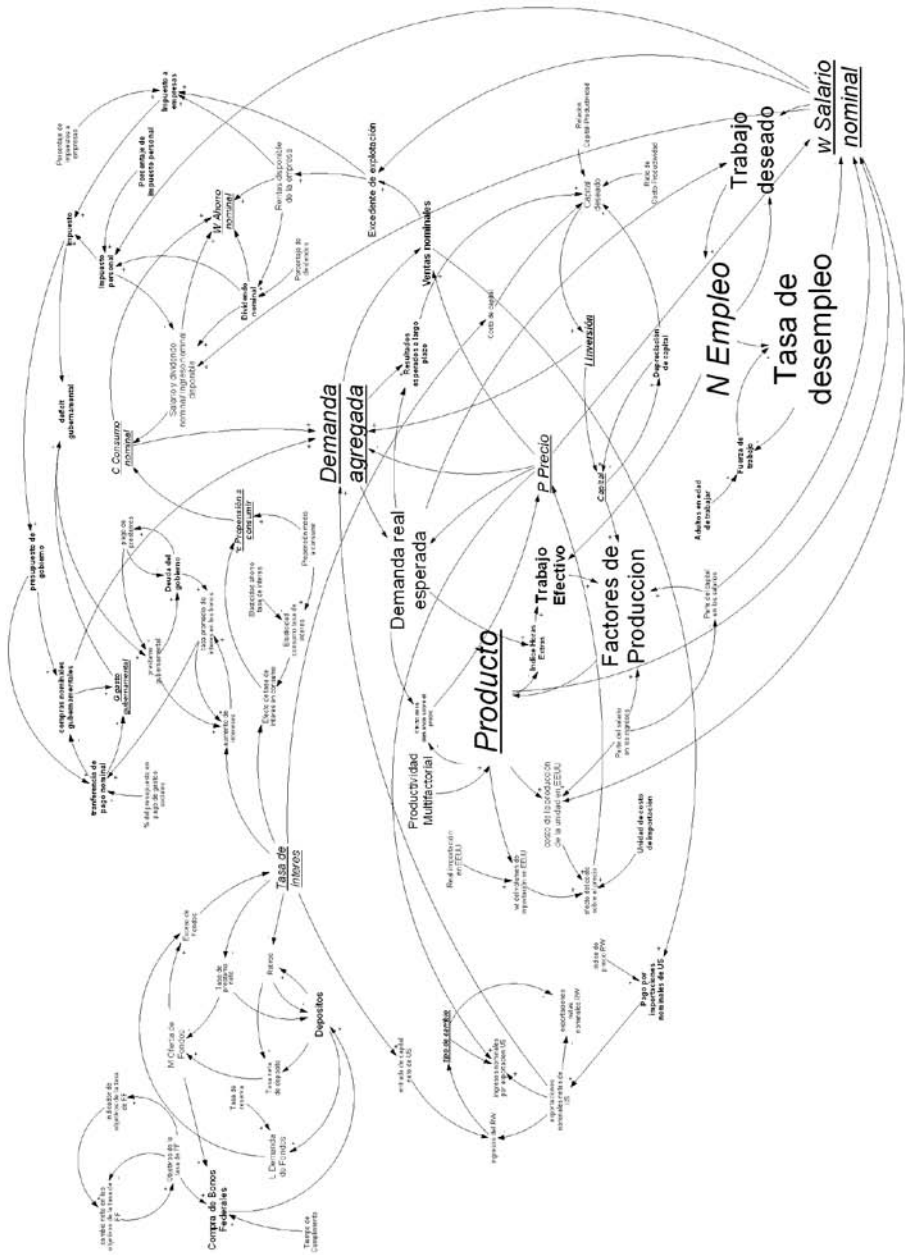
“Shock en”	Variables	Principales	Cobertura (%)
Consumo	19	12	67
Política monetaria	17	12	67
Precio	17	9	50
Trabajo	21	8	44
Capital	15	8	44
Gobierno	21	8	44
Dist. Ingreso	17	6	33
Productividad	9	4	22

Se evidencia que algunos de estos escenarios han conducido los estudiantes a través de gran parte de las variables principales, sobre todo “consumo” y “política monetaria”. Otros escenarios –especialmente “productividad” hicieron tocar muy pocas de estas variables.

Sin embargo, antes de entrar en interpretar los resultados, debemos también responder la segunda de las preguntas anteriormente planteadas. En el diagrama causal mostrado en la página siguiente, el tamaño de las letras de los nombres de variable corresponde al número de modelos de grupo en el cual han sido usados. Las variables subrayadas corresponden a las variables principales tratadas en el párrafo previo. Tal como los porcentajes de la tabla previa, el diagrama informa que muchas variables del modelo no han sido representadas en los trabajos de los grupos y otras variables sólo en parte de los grupos; sin embargo, la visualización deja ver el contexto del modelo entero (que los porcentajes esconden).

Se ve claramente la existencia de agrupaciones de variables más usadas en ciertas partes del modelo. La variable más usada (fuera de las obligatorias por la pregunta por responder de todos los grupos) es la demanda agregada, que también queda en una posición muy central en el diagrama.

Figura 3
 Diagrama causal con frecuencias



DISCUSION DE HALLAZGOS Y PROBLEMAS

Hallazgos

El uso del método de la RD ha permitido detectar:

1. que todos los grupos fueron fieles al modelo subyacente del MacroLab,
2. que algunos de los escenarios de *shock* llevaron a los estudiantes a construir modelos mentales que incluyen una gran proporción de las variables principales, pero otros no.

Si bien el primer punto no es sino la confirmación de algo que era de esperar, el segundo punto conduce a una pregunta importante: ¿por qué algunas variables han sido tomadas en cuenta por más grupos que otras variables?

En la próxima sección se muestra cómo la inclusión de los bucles de retroalimentación permite responder la pregunta e ir más allá en el sentido de diseñar una herramienta de planificación o diseño de escenarios de estudio.

Problemas - el nivel de los bucles

La dinámica de sistemas da mucha importancia a los bucles de retroalimentación. Sin embargo, en el procedimiento de la RD no aparecen –razón por la que los diagramas previos no fueron de “bucles causales”. Los bucles de retroalimentación son emergentes con respecto a las variables y vínculos causales. Al inspeccionar una variable, no es posible saber si ella forma parte de uno o varios bucles. De ello se desprende que al analizar un modelo al nivel de los bucles de retroalimentación, se forman agrupaciones de variables, como lo muestra la figura 4.

Al resaltar los bucles causales, esta figura permite ver la organización del modelo de una manera distinta a la de las variables más frecuentemente usadas. Y aún si la figura muestra solamente los 26 bucles más inmediatos (hay otros más largos), ya se ve que es un modelo complejo, en el cual muchos bucles se superponen parcialmente. Cada bucle está señalado por un número y el signo de su polaridad. Llama la atención que los bucles se concentran en algunas regiones que parecen poco conectadas entre ellas. Por ejemplo, los bucles 1-9, fuertemente entrelazados, no tienen una interfaz directa con los demás bucles. A través de la variable “demanda agregada”, un gran número de bucles se tocan mutuamente.

La figura 5 combina los bucles con la presentación diferenciada de las variables, de modo de dejar ver la relación entre la frecuencia de inclusión de las variables con las ubicaciones de los bucles.

Al observar la figura previa, surge la intuición que eventualmente la frecuencia de uso de las diferentes variables depende de si forman parte de uno o varios bucles de retroalimentación.

Lamentablemente, los software de dinámica de sistemas no muestran los bucles sino como parte de los diagramas con las variables y los vínculos. Pero es importante poder

Figura 4
Diagrama de bucles causales

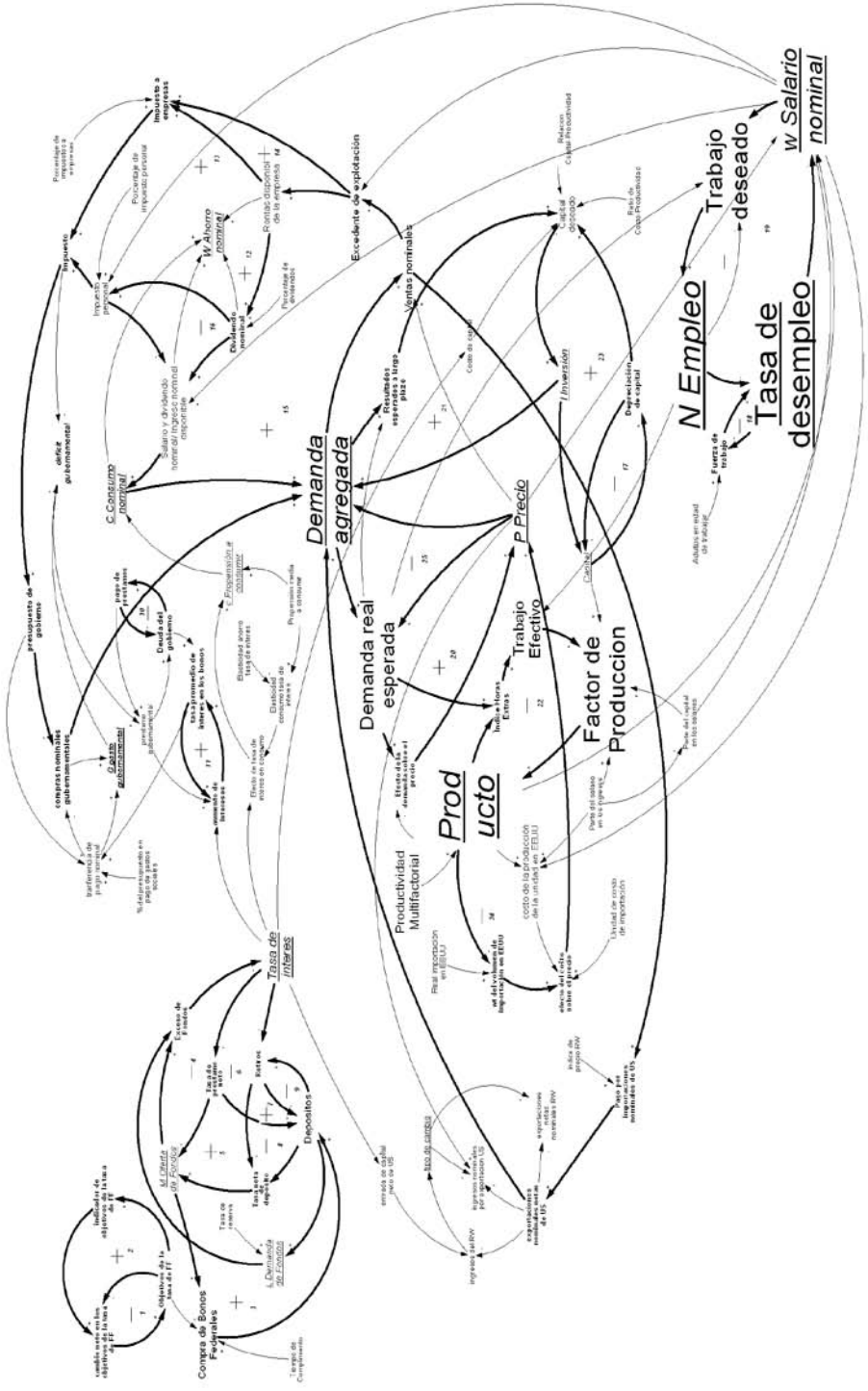
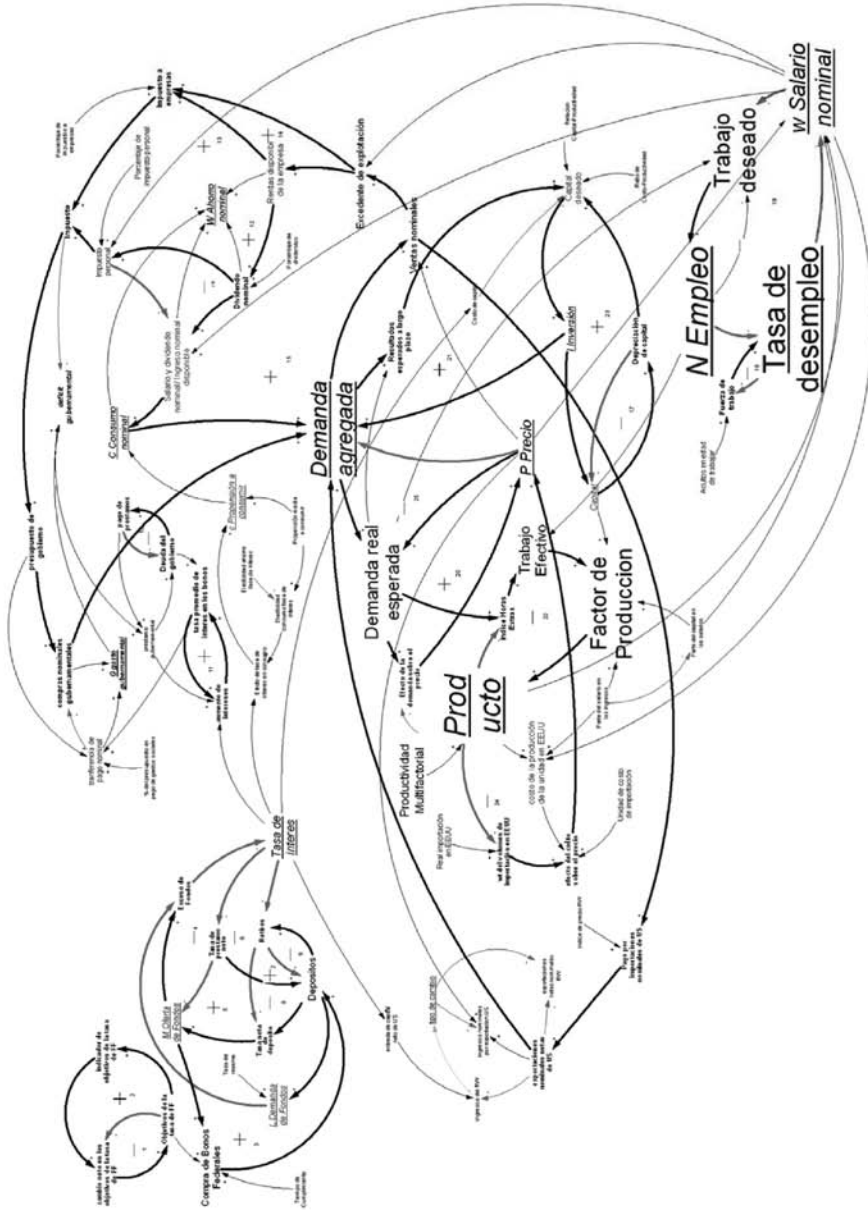


Figura 5
 DBC con indicación de frecuencia de inclusión de las variables

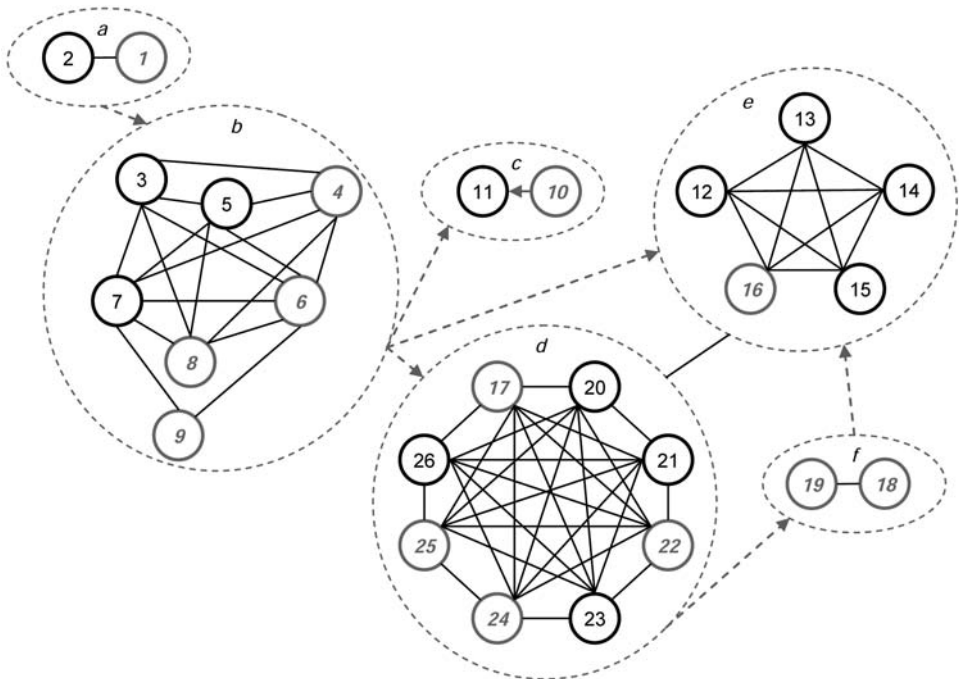


visualizar el modelo como un conjunto de bucles (solamente). La figura 6 muestra esto, con las siguientes convenciones de representación:

- los bucles aparecen como círculos con borde grueso, identificados por su número (comparar con los DBC previos); si la polaridad es positiva, el borde y el número son negros, si es negativa el color es gris y la fuente es cursiva.
- una línea negra sólida entre dos bucles representa la activación mutua: si algo gatilla un cambio en uno de los bucles, éste se propaga al otro bucle, y viceversa. En general, una o varias variables pertenecen a varios bucles (los bucles se superponen parcialmente).
- una línea gris y puntillada representa una agrupación de bucles. Entre dos tales agrupaciones no hay conexión directa, pero una o varias variables intermedias permiten llegar de uno al otro; las flechas grises indican la dirección de esta activación, que por lo tanto es en sentido único.

Figura 6

Los bucles del modelo



Los bucles 1 y 2 de la agrupación *a* comparten la mayoría de sus variables constituyentes, y no es posible inducir un cambio en uno sin que también cambie el otro. Lo mismo ocurre entre la mayoría de los bucles de la agrupación *b*. Además, un cambio

que interviene dentro de la agrupación *a* se propaga a la agrupación *b*, pero el contrario no es verdad. Análogamente ocurre entre las agrupaciones *b* y *c*, *b* y *d*, *b* y *e*, *b* y *f* y finalmente *f* y *e*.

La separación entre las agrupaciones *d* y *e* obedece al deseo de mantener el número de líneas negras lo más bajo posible; de hecho, todos los bucles de *d* y de *e* incluyen la variable “demanda agregada”, por lo cual habría sido correcto representarlos a todos como una red de tipo “estrella”. Sin embargo, tal diagrama sería difícil de analizar. Para evitar esta dificultad, se separaron en dos agrupaciones y están contactados por una línea negra sólida, que representa el hecho de su fuerte conexión.

Basado en este diagrama, podemos ver que si un *shock* interviene en una variable que pertenece a un bucle de la agrupación *a*, puede propagarse a través de todas las agrupaciones y todos los bucles (y sus respectivas variables). En cambio, un *shock* en una variable del bucle 17 (agrupación *d*), dejaría excluidos los bucles de las agrupaciones *a*, *b* y *c*. Todas estas relaciones de activación se han representado en la siguiente matriz:

Tabla 6

Matriz de activación de los bucles causales

Bucles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1																									
2	1	1																								
3			1	1	1	1	1	1											1	1	1	1	1	1	1	1
4			1	1	1	1	1	1											1	1	1	1	1	1	1	1
5			1	1	1	1	1	1											1	1	1	1	1	1	1	1
6			1	1	1	1	1	1											1	1	1	1	1	1	1	1
7			1	1	1	1	1	1											1	1	1	1	1	1	1	1
8			1	1	1	1	1	1											1	1	1	1	1	1	1	1
9						1	1																			
10										1																
11											1															
12												1							1	1	1	1	1	1	1	1
13													1						1	1	1	1	1	1	1	1
14														1					1	1	1	1	1	1	1	1
15															1				1	1	1	1	1	1	1	1
16																1			1	1	1	1	1	1	1	1
17												1	1	1	1	1			1	1						
18												1	1	1	1	1			1							
19												1	1	1	1	1			1							
20												1	1	1	1	1			1	1						
21												1	1	1	1	1			1	1						
22												1	1	1	1	1			1	1						
23												1	1	1	1	1			1	1						
24												1	1	1	1	1			1	1						
25												1	1	1	1	1			1	1						
26												1	1	1	1	1			1	1						

Los números de los bucles aparecen como rótulos de fila y de columna, y la tabla se lee de izquierda a derecha, por ejemplo: “el bucle 1 activa al bucle 2”. Las relaciones que aparecen como línea sólida en el diagrama previo son simétricas; las que son representadas como flechas grises van en sentido único: “el bucle 1 activa al bucle 5”.

Tanto el diagrama como la matriz ponen de manifiesto que las variables de algunas agrupaciones de bucles se prestan para definir escenarios de *shock* con un gran potencial

de involucrar virtualmente todos los bucles y por lo tanto a todas las variables principales. Al mismo tiempo, algunas agrupaciones son más bien islas en el modelo, y plantear un *shock* en una de sus variables equivale a excluir la posibilidad de involucrar a variables de los bucles de otras.

Un análisis de los diferentes *shocks* respecto de los bucles que se activan muestra esta diferencia. Primero, hay que reconocer que los *shocks* son, en general, perturbaciones exógenas, por lo cual no intervienen en variables perteneciente a un bucle, sino que en variables que se conectan con otras variables, que –a su vez– sí pertenecen a ciertos bucles. En base de las membresías de las diferentes variables a determinados bucles, se parte considerando las variables de *shock* y las activaciones sucesivas de bucles, se descubre que los grupos de bucles alcanzables desde la variable del *shock* no son siempre los mismos:

Tabla 7

Bucles alcanzados por los diferentes *shocks*

Sector	Grupo inicial	Grupos activados	% bucles
Consumo	b	c, d, e, f	92
Dinero	b	c, d, e, f	92
Política monetaria	b, d, e	c, f	92
Trabajo	f	e, d	58
Distribución del ingreso	e	d, f	58
Gobierno	e	d, f	58
Tasa de cambio	d, e	f	58
Capital	d	e	50
Productividad	d	e	50
Precio	d	e	50

Por ejemplo, el *shock* del grupo del sector “trabajo” interviene en una variable conectada a los bucles del grupo *f*, que a su vez permite llegar a los bucles de los grupos *e* y *d*. Nos debe llamar la atención que solamente los escenarios de *shock* de los sectores “consumo”, “dinero” y “política monetaria” tienen un contexto de estructura de bucles causales que incluya a casi todos los bucles (y sus respectivas variables); los demás escenarios sólo se conectan con aproximadamente la mitad de los bucles.

Consideremos también que el presente análisis está enteramente basado en la estructura causal del modelo, es decir, en las *posibilidades* estructurales de traspasar cambios entre variables. Sin embargo, no siempre todos los bucles se activan. Ello depende de los valores particulares del *shock* y de sus efectos inmediatos. Es así que un análisis de la dominancia de bucles y de la polaridad dominante enfocado en las conductas (Ford, 1999) se presenta como alternativa para analizar la cobertura de diferentes *shocks* en

términos de variables principales involucradas. Sin embargo, esta posibilidad no es el objeto del presente artículo.

Se concluye que la razón de la desigual cobertura de variables entre los escenarios es la activación desigual de bucles por los diferentes *shocks*. En base de esta constatación, se puede especificar una solución para el problema.

Consecuencias para itinerarios flexibles

La presencia de múltiples bucles de retroalimentación en un modelo grande como MacroLab no asegura la conexión entre todas las partes del modelo. En este sentido, la idea de asignar un “sector” del modelo a cada grupo de estudiantes –si bien parecía indicada al inicio de la experiencia– debe ser descartada.

El docente como diseñador de experiencias de aprendizaje debe entonces definir los escenarios de manera diferente. Haremos ahora el supuesto que se requieren escenarios chicos y grandes. Los escenarios chicos activarán una parte chica de los bucles y permiten tratar enfocadamente ciertas variables o de introducir los estudiantes al trabajo con un modelo grande. Los escenarios grandes activarán la mayor parte o incluso todos los bucles; si hay varios de cobertura suficientemente similar, por lo tanto se puede dar libertad de elección a los estudiantes y el curso gana en flexibilidad –lo que fue la intención de la exploración con MacroLab.

Se requiere entonces conocer de antemano la cobertura de bucles de cualquier escenario de *shock*, por lo cual será necesario recorrer por un proceso de diseño con las siguientes etapas:

- a) determinar el conjunto de bucles de retroalimentación del modelo;
- b) determinar la pertenencia de las diferentes variables a los diferentes bucles;
- c) determinar las conexiones entre los bucles;
- d) definir la variable donde se aplicará el *shock* (y las variables de interés);
- e) determinar los bucles con los cuales se conecta la variable del *shock*;
- f) determinar los bucles conectados a este conjunto inicial de bucles.

Claramente, los pasos a), b) y c) son genéricos, ya que se deberían repetir para cada escenario particular. Esto hace deseable la existencia de una herramienta que facilite la realización de estos pasos. Lamentablemente, ninguno de los softwares disponible en el mercado permite hacer esto directamente. Sin embargo, las diferentes matrices presentadas en este artículo permiten implementar un método correspondiente.

Existen algoritmos de detección de bucles, por lo cual el paso a) ya no requiere una nueva solución. Los softwares detectan simplemente todos los bucles que pasen por una determinada variable, pero se han publicado métodos para detectar conjuntos independientes de bucles (Kampmann, 1996; Kampmann y Oliva, 2004; Oliva, 2006). Por tanto, estos métodos buscan conjuntos de bucles que sean lo menos dependientes entre ellos (lo que minimiza los traslapes entre bucles); ello no corresponde a nuestra meta de disponer de un conjunto de bucles con la mayor conectividad posible entre ellos. Por lo tanto, hace falta explorar hasta qué punto los conjuntos de bucles indicados por estos métodos se prestan para nuestros fines. Hasta el momento de avanzar en este tema, el docente tendrá que proceder por prueba y error.

El mismo recorrido de detección de bucles pasa por las variables, por lo cual la lista de variables de cada bucle puede ser derivada de este mismo paso. Las conexiones entre los bucles requieren la comparación de todos los pares de bucles y la detección de eventuales variables pertenecientes a ambos bucles en comparación. Este mismo paso c) nos genera la matriz de activación presentada en la tabla 6. El paso e) hace uso de las listas de variables por bucle para identificar los bucles iniciales.

Finalmente, el paso f) consiste en explotar la matriz de activación. En ella encontramos las conexiones directas entre los bucles y podemos iniciar la búsqueda con el conjunto inicial de bucles. Para cada uno buscamos las celdas "1" e identificamos el número del bucle (rótulo de la columna) y lo insertamos en una lista aparte, si todavía no se encuentra en ella. Cuando terminamos con el último de los bucles iniciales comparamos el conjunto de bucles iniciales con la lista: todos los números en la lista que no están en los bucles iniciales se copian a la lista de bucles iniciales. Luego se repite el procedimiento, hasta que en una repetición (iteración) no se han agregado nuevos bucles: esto será la señal de que ya no se ampliará el conjunto de bucles activables. De manera opcional, podríamos calcular el porcentaje de cobertura en términos de bucles, el porcentaje de cobertura de las variables de modelo e incluso verificar si ciertas variables específicas están dentro del conjunto de estas variables.

Tal herramienta permitiría a docentes de macroeconomía confeccionar actividades de estudio para que sus estudiantes *exploren* la naturaleza de los procesos macroeconómicos de manera progresiva, flexible y con el rigor de la simulación, sin obligarlos a *modelar* la macroeconomía. Tal exploración es una variante del aprendizaje por descubrimiento, que podría ir más allá del uso de los ILE basados en la proyección de DBC. Cabe mencionar que la dinámica de sistemas ofrece una serie de modelos que son un referente en su ámbito, pero que son complejos de analizar; basten como ejemplos *World3* (Meadows *et al.*, 2004) y *Urban dynamics* (Forrester, 1969). Poder facilitar el uso de tales modelos en la docencia puede consistir en desarrollar la herramienta descrita, que reduce el esfuerzo de preparación e incluso podría acercar los modelos de dinámica de sistemas a académicos que actualmente no practican esta disciplina.

Consecuencias para el estudio de modelos mentales en el contexto de la dinámica de sistemas

El presente intento indica que la comparación de variables y vínculos causales no es satisfactoria del punto de vista de la dinámica de sistemas. Si los bucles de retroalimentación son relevantes para entender la conducta de un sistema, también lo son para analizar la forma como una persona comprende este sistema. Por lo tanto, los bucles deberían formar parte de la comparación.

No hay métodos formalmente establecidos para comparar los bucles entre diferentes modelos mentales. Una posibilidad de comparar versiones sucesivas de modelos mentales ha sido enunciada por Schaffernicht (2006): se basa en que entre dos versiones del modelo mental que una persona se hace de un sistema dinámico, puede darse que un bucle aparezca, que se modifique o que sea eliminado. Se puede entonces detectar el porcentaje de los bucles que haya sufrido tales cambios y construir un indicador de cambio.

Este procedimiento podría ser adaptado para ser usado en la comparación de los modelos mentales que diferentes personas se hacen de un sistema dinámico. Sin embargo, solamente funcionará si ambas personas se basan en el mismo conjunto de bucles, ya que este método no contempla la posibilidad de múltiples conjuntos de bucles. Asumiendo que en un caso como MacroLab, el “conjunto más corto de bucles” (Oliva, 2006) sirva, podemos incorporar el método de construcción de este conjunto al procedimiento de exploración de los estudiantes. En este caso, todos se basarían en un mismo conjunto de bucles.

No obstante, si la detección de los bucles es parte del proceso de aprendizaje de los estudiantes (o de otros actores), y si no se puede garantizar que haya un conjunto único de bucles, entonces un método de comparación de modelos mentales debería poder trabajar con diferentes conjuntos de bucles. En este caso, habrá que agregar al procedimiento de Schaffernicht (que fue bucle por bucle) un componente que compara los *conjuntos* de bucles (al nivel global). Se abre aquí un campo de investigación que no solamente puede servir al ámbito de la educación, sino que también a otras áreas de la investigación, como en toma de decisiones.

CONCLUSIONES

El objetivo de la exploración reportada en estas páginas fue de averiguar si los modelos mentales que elaboran estudiantes de macroeconomía al indagar diferentes *shocks* –es decir, entrar el modelo desde diferentes variables– son similares entre ellos y con respecto a las variables principales, que típicamente se discuten en los libros docentes de nivel introductorio.

Se definieron 10 escenarios de *shock* y los modelos mentales (causales) de 10 grupos de estudiantes fueron comparados con un modelo de referencia y entre ellos mediante el método de la “razón de distancia” (RD).

En efecto, los RD de los 10 grupos, en relación con el modelo de referencia, fueron bastante similares. También aparecieron similares en las comparaciones entre los grupos. Sin embargo, una inspección más detallada –cosa que no facilita la RD por su carácter sintético– reveló diferencias preocupantes.

El análisis de los bucles de retroalimentación y de las relaciones entre ellos permitió aclarar que algunos bucles son más conectados con los demás bucles que otros: existen regiones más aisladas que otras, por lo cual las variables que pertenecen solamente a estos bucles no se prestan para iniciar indagaciones que cubran la globalidad del modelo (MacroLab). Se reveló así que el método de comparación de los modelos vía RD es insatisfactorio, porque no toma en cuenta los bucles de retroalimentación.

Se propuso un método de diseño de actividades de aprendizaje, donde el docente analiza las relaciones entre los bucles de retroalimentación y determina las variables de *shock*, de modo de asegurar una cobertura igual de cierto conjunto de variables por parte de todos los grupos de estudiantes. De esta manera, se podrá conservar la idea de diseñar itinerarios variados de aprendizaje, asegurando flexibilidad. Sin embargo, la multiplicidad de conjuntos de bucles y el origen de los métodos de detección llaman a realizar estudios con la meta de confirmar si estos métodos son adecuados para este uso.

También se arrojó luz al proceso de trabajo de los estudiantes en este contexto; se encontró que hay dos heurísticas, de las cuales la primera es aconsejable: el uso de un DBC general para guiar la exploración del comportamiento del modelo de simulación. La segunda variante, si bien más intuitiva para los estudiantes de este estudio, se desaconseja.

Finalmente, se señaló la necesidad de diseño de un método de comparación de modelos mentales que incluya el concepto de bucle y lo explota. Esto serviría no sólo al diseño de actividades de aprendizaje, sino que también a otras áreas donde los modelos mentales de los actores frente a sistemas dinámicamente complejos son de interés.

MacroLab será el contexto de una nueva prueba del revisado método de diseño. En este sentido, el presente trabajo se cierra reafirmando que el uso indicado de los bucles como ayuda al diseño de actividades de exploración de modelos de simulación, presenta la oportunidad de incluir modelos substancialmente más complejos que los usuales en la docencia universitaria.

BIBLIOGRAFIA

- Doyle, J. K. & D. N. Ford (1998). Mental models concepts for system dynamics research. *System Dynamics Review* 14 (1): 3-29.
- Doyle, J. K. & D. N. Ford (1999). Mental models concepts revisited: some clarifications and a reply to Lane, *System Dynamics Review* 15 (4): 411-415.
- Forrester, J. (1969). *Urban dynamics*, Productivity Press.
- Ford, D. (1999). A behavioral approach to feedback loop dominance analysis, *System Dynamics Review* 15 (1), Spring 1999; pág. 3.
- Johnson-Laird, P. N. (1999). Deductive reasoning, *Annual Review of Psychology*; 1999; 50: 109-135.
- Kampmann C. E. (1996). Feedback Loop Gains and System Behavior (<http://www.cbs.dk/content/download/10577/157914/file/FB%20loops.pdf>; 22/9/2008).
- Kampmann, C. E. & R. Oliva (2006). Loop eigenvalue elasticity analysis: three case studies, *System Dynamics Review* 22 (2), (Summer 2006): 141-162.
- Oliva, R. (2006). Model structure analysis through graph theory: partition heuristics and feedback structure decomposition. *System Dynamics Review* 20 (4), (Winter 2004): 313-336.
- Lane, D. C. (2008). The Emergence and Use of Diagramming in System Dynamics: A Critical Account, *Systems Research and Behavioral Science* 25: 3-23.
- Langfield-Smith, K. & A. Wirth (1992). Measuring differences between cognitive maps, *Journal of Operational Research* 43 (12): 1135-1150.
- Markóvski, L. & J. Goldberg (1995). A method for eliciting and comparing causal maps, *Journal of Management* 21 (2), pp. 305-333
- Meadows, D., J. Randers and D. Meadows (2004). *Limits to Growth –the 30 year update*. Chelsea Green.
- Morecroft, J. (2007). *Strategic modelling and business dynamics: A feedback approach*. John Wiley.
- Quiroz, Juan F. y Carlos Ch. Aravena (2008). “Búsqueda de Posibles Diferencias en Modelos Mentales Resultantes de la Exploración de Sectores en un Modelo de Simulación Macroeconómico, el caso MacroLab ILE”, Memoria de grado de Ingeniería comercial, Universidad de Talca, agosto 2008.
- Schaffernicht, M. (2006). Detecting and monitoring change in models. *System Dynamics Review* Vol. 22, Nº 1, (Spring 2006): 73-88.

- Schaffernicht, M. (2007). Causality and diagrams for system dynamics, Actas de la 50th International Conference of the System Dynamics Society, Boston, julio 2007.
- Wheat, David (2007a). "The Feedback Method - A System Dynamics Approach to Teaching Macroeconomics", Doctoral dissertation, University of Bergen, March 2007.
- Wheat, David (2007b). "The Feedback Method of Teaching Macroeconomics: Is It Effective?", *System Dynamics Review*, 23 (4), Winter 2007, pp. 391-413.