

# SER DIRECTO PUEDE TRAERTE PROBLEMAS, PERO SER INDIRECTO TAMBIÉN: LAS REALIMENTACIONES EN DINÁMICA DE SISTEMAS CUALITATIVA Y CUANTITATIVA

*Artículo propuesto para el V Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas*

Andrés Mejía D.  
Fabio Andrés Díaz  
Gloria Maritza Díaz  
Camilo Olaya

Departamento de Ingeniería Industrial  
Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

Correspondencia: [jmejia@uniandes.edu.co](mailto:jmejia@uniandes.edu.co)

## Resumen

En la literatura de la dinámica de sistemas se ha tendido a asociar a los ciclos de refuerzo con comportamientos de cambio acelerado, y a los ciclos de balance con comportamientos de cambio desacelerado. El trabajo de Richardson mostró, sin embargo, que las definiciones corrientes en enfoques cualitativos de la dinámica de sistemas sobre refuerzos y balances —establecidas en términos de la multiplicación de signos de las polaridades de las relaciones causales que las constituyen— no son necesariamente consistentes con dicho comportamiento. Su propuesta de redefinición, que intenta enfrentar esto aunque no siempre es del todo consistente, se basa en las relaciones causales entre las variables de estado (niveles) y sus derivadas con respecto al tiempo (flujos). En los diagramas de ciclos causales, sin embargo, se acostumbra representar ciclos que no hacen explícitas variables de tasa de cambio. En lugar de sugerir, como algunos lo han hecho, que éste es un problema de que la representación mediante diagramas de ciclos causales sea incompleta, nosotros argumentamos que este tipo de ciclos —que llamaremos “directos”— en sí mismos pueden tener sentido. La existencia de dichos ciclos plantea importantes preguntas tanto para la dinámica de sistemas cualitativa como para la cuantitativa.

Palabras clave: relación estructura-comportamiento, ciclo directo, ciclo indirecto, pensamiento dinámico-sistémico

## Introducción

Se ha convertido en sentido común, dentro de la comunidad de dinámica de sistemas, la idea de que los ciclos de realimentación positiva producen en sus variables de estado, *ceteris paribus*, *comportamientos divergentes* (es decir, de crecimiento o decrecimiento acelerado). Igualmente se acepta que los ciclos de realimentación negativa normalmente producen en sus variables de estado, *ceteris paribus*, *comportamientos convergentes* (es decir, de crecimiento o decrecimiento desacelerado). Esta asociación de elementos de estructura (refuerzos y balances) con elementos de comportamiento (cambio acelerado o desacelerado) es posiblemente la fuente principal de un pensamiento sistémico basado en la dinámica de sistemas, así como lo que permite utilizar los modelos de simulación de una manera inteligente —y no simplemente como cajas negras. Una muestra de ello consiste en que en la presentación de los arquetipos sistémicos tradicionales, se

sugieren comportamientos posibles a partir de una estructura causal (Braun, 2002; Kim, 1993, 1995). Si esta asociación llegara a demostrarse equivocada, podría entonces concluirse que los enfoques y herramientas corrientes del enfoque cualitativo no podrían hacer un uso riguroso de una de las intuiciones y premisas más fundamentales de la dinámica de sistemas como disciplina: la de la existencia de una relación entre estructura y comportamiento. Como máximo, podrían hacer uso de la noción de realimentación, pero sin poder derivar conclusiones sobre comportamiento. Y el proyecto postulado por Richardson (1999) y tomado por algunos de nosotros de desarrollar una dinámica de sistemas cualitativa de una manera sólida y rigurosa (Mejía & Díaz, 2006) se podría derrumbar definitivamente.

El mismo Richardson ya notó hace décadas (1986 y 1995) que las definiciones de *ciclo de realimentación positiva* y de *ciclo de realimentación negativa*, basadas en la multiplicación de los signos de las polaridades de las relaciones que constituyen cada ciclo, y que se utilizan comúnmente al construir *diagramas de ciclos causales* (en adelante DCC), no concuerdan necesariamente con las ideas de comportamiento divergente y de comportamiento convergente, respectivamente, que mencionamos en el párrafo anterior. Para que sí concordaran con los comportamientos mencionados, para ciclos de primer orden (con un solo nivel) Richardson (1995) redefinió “ciclo de refuerzo” y “ciclo de balance” en términos de las derivadas de los flujos respecto a los niveles. Pero aquí surgen dos problemas: 1) Como mostraremos más adelante, esta última definición no garantiza la relación entre estructura y comportamiento que Richardson presumiblemente esperaba; y 2) estas definiciones sólo son aplicables, en la práctica, si contamos con representaciones que hagan explícitas variables de tipo  $X$  y  $dX/dt$ . Este es el caso en los *diagramas de niveles y flujos* (en adelante DN&F), pero no necesariamente en los DCC. ¡Y de aquí se obtiene la sorprendente conclusión de que en un DCC no necesariamente podremos saber si los ciclos de realimentación que aparecen son de refuerzo o de balance!

Ahora, ¿es esto una falencia de los DCC, como algunos lo han sugerido (Richardson, 1986; Sterman, 2000)? ¿Significa esto que se debe abandonar en la dinámica de sistemas cualitativa la intuición de la existencia de una relación entre estructura y comportamiento? ¿Los DCC en los cuales no aparecen explícitamente variables de tasa de cambio ( $dX/dt$ ) están definidos de manera incorrecta? En este artículo discutiremos estas preguntas, como un acercamiento al propósito de intentar comprender si es posible desarrollar una dinámica de sistemas cualitativa y un pensamiento dinámico-sistémico sólidos y rigurosos. De manera interesante, esta discusión también dará origen a algunas preguntas importantes sobre la dinámica de sistemas cuantitativa, alrededor de las implicaciones que tiene el hecho de que en ella se haya renunciado al trabajo con ciclos de realimentación que no incluyan variables de tasa de cambio.

## 1. Tipos de relaciones entre variables

Sterman, siguiendo a Richardson (1986), ha definido una relación causal positiva como aquella en la cual “si la causa **augmenta**, el efecto **augmenta** por encima de lo que lo habría hecho de otro modo, y si la causa **disminuye**, el efecto **disminuye** por debajo de lo que lo habría hecho de otro modo” (Sterman, 2000, p.139, énfasis en el original, traducción nuestra). Y de forma similar, una relación causal negativa sería una en la que “si la causa **augmenta**, el efecto **disminuye** por debajo de lo que lo habría hecho de otro modo, y si la causa **disminuye**, el efecto **augmenta** por debajo de lo que lo habría hecho de otro modo” (íbid.). Aunque puede ser un poco difícil de entender, esta definición le permite cubrir bajo una sola definición los dos tipos diferentes de relaciones que

tradicionalmente se representan en dinámica de sistemas: 1) entre dos variables definidas de forma independiente (que llamaremos “relaciones directas”), y 2) entre una tasa de cambio de una variable, y la variable misma (que llamaremos “relaciones de tasa de cambio”). Teniendo en cuenta que la influencia causal de una variable X sobre una variable Y debe poder expresarse en una ecuación que especifique el valor que Y tomará si previamente X ha tomado un cierto valor, las implicaciones matemáticas más directas de estas definiciones son las siguientes (adaptado de Sterman, 2000, p.139, con nuestra terminología):

Tipo de relación	Positiva	Negativa
Directa	$\partial Y / \partial X > 0$	$\partial Y / \partial X < 0$
Tasa de cambio	$Y = \int_{t_0}^t (X + \dots) ds + Y_{t_0}$	$Y = \int_{t_0}^t (-X + \dots) ds + Y_{t_0}$

Tabla 1. Implicaciones matemáticas de las relaciones positivas y negativas

Para efectos de nuestra discusión posterior, es importante también ahora hacer una distinción adicional entre dos tipos de relaciones directas: *analíticas* y *causales*. En una relación analítica de X a Y, Y dependerá de X *por definición*. En una relación de este tipo, un evento que pueda ser representado por un cambio en X, producirá un cambio en Y; pero en algún sentido podríamos decir que el cambio en X y el cambio en Y representan el mismo evento en el mundo. Consideremos el siguiente ejemplo en el cual la expansión permitida en el área de una ciudad depende de la densidad de población existente en un momento dado.

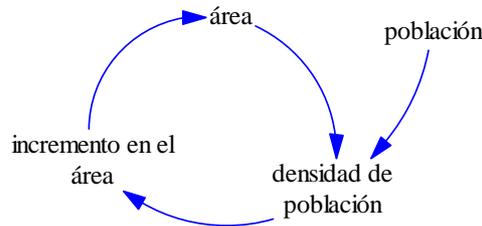


Figura 1. Diagrama de densidad de población y área

La relación que va de “densidad de población” a “incremento en el área” es causal: Las dos son variables que caracterizan dos aspectos diferentes de la realidad, pero que sin embargo están conectados de manera contingente por algunos mecanismos que definen una política (culturales, sociales, políticos, etc.) de tal manera que cambios en una van a desencadenar cambios en la otra. De acuerdo con nuestras definiciones (arriba), la relación que va de “incremento en el área” a “área” es de tipo tasa-de-cambio. Y las relaciones que van de “área” a “densidad de población” y de “población” a “densidad de población” son analíticas, ya que “densidad de población” *se define como* la población dividida por el área.

En toda la literatura consultada, se llama a los tres tipos de relaciones “causales”. Aunque se suele distinguir las relaciones causales de las de tipo tasa-de-cambio, las relaciones analíticas se tienden a asumir como causales. Sin embargo, estas diferencias son importantes para nuestro argumento: las relaciones analíticas no explican cómo o por qué es que se producen cambios en el estado del sistema, mientras que las causales sí. Ahora, entendiendo que una relación transmite cambios en las variables –en cuanto a que cambios en una variable causa X se reflejarán en cambios en una variable efecto Y–, aquellos cambios que se transmitan a través de enlaces analíticos necesariamente tendrán lugar *simultáneamente*. En el ejemplo anterior, en el mismo momento en

que cambia la población, *ceteris paribus*, habrá cambiado la densidad. No hay, ni puede haber en principio, un lapso de tiempo desde que se produce el cambio en la población, hasta que se produce el cambio en la variable densidad. En relaciones causales, sin embargo, se reconoce que existe una cierta precedencia de tiempo de la causa con respecto al efecto (Dyner, 1993).

## 2. Ciclos directos y ciclos indirectos

Comenzaremos llamando “ciclos directos” a aquellos ciclos de realimentación que sólo están constituidos por relaciones causales o analíticas, y “ciclos indirectos” a aquéllos que además incluyen relaciones tipo tasa-de-cambio.

En dinámica de sistemas cuantitativa, es aceptado que todo ciclo de realimentación debe incluir al menos un nivel y un flujo asociado (Forrester , 1968, p.1-10; Richardson , 1995, p.68); o, en nuestras palabras, que *todo ciclo de realimentación debe necesariamente ser indirecto*. Por otro lado, en la dinámica de sistemas cualitativa es común encontrar representaciones de sistemas en DCC que **NO** presentan de manera explícita relaciones de tipo tasa-de-cambio; más aún, no existe en las instrucciones para construir DCC consultadas (Coyle, 1996; Sterman, 2000; Wolstenholme, 1990) nada que fuerce a que los ciclos sean indirectos.

En conclusión, en dinámica de sistemas cuantitativa los ciclos directos son prohibidos, mientras que en la dinámica de sistemas cualitativa, son permitidos. Ahora, ¿cuál es la raíz de esta inconsistencia? ¿Y qué implicaciones tiene? Nosotros creemos que no existen razones para descartar en principio la existencia de ciclos directos. En nuestra revisión de la literatura de la dinámica de sistemas, por ejemplo, no encontramos ninguna justificación para su prohibición en la dinámica de sistemas cuantitativa; y adicionalmente su uso generalizado en dinámica de sistemas cualitativa sugiere que ellos tienen un sentido para quienes construyen DCC. Una posible aunque incorrecta objeción a la existencia de ciclos directos podría provenir de una discusión de la representación matemática del *cambio*. Supongamos el siguiente ciclo directo abstracto:

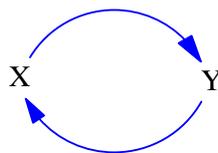


Figura 2. Ciclo directo

Suponiendo que no existe nada más en este universo que afecte causalmente a X o a Y, las ecuaciones que determinan el comportamiento de X y de Y en este sistema deberían especificarse como  $X=f(Y)$  y  $Y=g(X)$ . Pero notemos que aquí se tiene un problema de circularidad: para saber qué valor toma Y, necesitamos saber de antemano qué valor toma X, para lo cual necesitamos saber de antemano qué valor toma Y, para lo cual necesitamos saber de antemano qué valor toma X, para lo cual necesitamos... Más aún, reemplazando Y por  $g(X)$  en la primera ecuación de las planteadas, se obtiene que  $X=f(g(X))$ . Esto sugiere una condición lógica para que X y Y puedan efectivamente estar gobernadas por las ecuaciones  $f(Y)$  y  $g(X)$  respectivamente. ¡Pero esta condición es tan restrictiva que para muchos casos descartaría la posibilidad de existencia de X y de Y, y para muchos otros la posibilidad de que las dos variables tomen muchos valores que realmente sí son posibles! Por ejemplo, suponiendo  $X=Y$  y  $Y=X/2$ , y siguiendo el procedimiento de

reemplazo mencionado arriba, se tendría que la única posibilidad lógica es que se cumpla  $X=Y=0$ . Pero ésta es una restricción que en la mayoría de los casos sería absurda. Más bien,  $X=f(g(X))$  (y por extensión  $Y=g(f(X))$ ) debería determinar los puntos de equilibrio, o los valores de  $X$  para los cuales la realimentación no induce cambios. ¿Cómo se resuelve este problema? Debemos recurrir aquí a la distinción entre relaciones analíticas y relaciones causales enunciada en la sección anterior, y en particular a la diferencia entre ellas con respecto a la temporalidad: recordemos que en una relación analítica los cambios en la variable origen (la que tradicionalmente se ha llamado “variable causa”) se transmiten a la variable destino (la que tradicionalmente se ha llamado “variable efecto”) de forma inmediata; es decir, sin que transcurra siquiera un instante de tiempo. En las relaciones causales sí existe una diferencia en el tiempo entre dichos cambios. Esto sugiere que si, por ejemplo, la relación que va de  $X$  a  $Y$  en el sistema de la figura 2 es causal, entonces la ecuación para  $Y$  podría estar dada por  $Y_t=g(X_{t-\Delta t})^1$ . Y esto resuelve el problema de circularidad: Para conocer el valor de  $Y$  en el tiempo  $t$ , necesitamos conocer a  $X$  en el tiempo  $t-\Delta t$ , lo cual nos puede llevar a necesitar conocer el valor de  $Y$  en un tiempo anterior, ¡pero no al mismo tiempo! También elimina las restricciones lógicas mencionadas antes que nos llevaban a condiciones absurdas.

Es interesante ver que esta discusión muestra adicionalmente que se presenta una inconsistencia lógica al intentar construir un ciclo de realimentación constituido exclusivamente por relaciones analíticas. A estos nosotros los llamamos “ciclos ficticios”. Hay que notar que ninguna de las instrucciones revisadas sobre cómo construir DCC alerta sobre estos ciclos y su inconsistencia lógica, a la vez que en nuestra experiencia estos son frecuentemente formulados por estudiantes aprendices. El siguiente es un ejemplo de un ciclo ficticio en una situación de mercado en la cual sólo dos empresas (A y B) compiten:

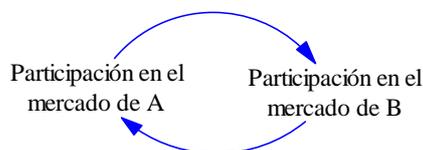


Figura 3. Ciclo ficticio

Es interesante encontrar que, a pesar del error lógico que constituyen, los ciclos ficticios en la literatura no son algo de ciencia ficción. Consideremos el siguiente ejemplo de Senge para el arquetipo de “Éxito para quien tiene éxito” que caracteriza el uso de un recurso común como el tiempo que se dedica al trabajo y al hogar (fig. 4). El ciclo en el centro del diagrama es un ciclo ficticio compuesto por relaciones analíticas e imposible de resolver y de simular. Aún más, siguiendo el análisis tradicional de polaridades el ciclo mencionado es de refuerzo. Senge aclara, incorrectamente, que este ciclo de refuerzo no produce descontrol porque hay un límite que es la cantidad de tiempo total (pp. 308, 406).

<sup>1</sup> Ésta es la manera más simple de representar esa precedencia temporal entre la causa y el efecto; sin embargo, existen otras —por ejemplo suavizaciones— que podrían ser más precisas en algunas circunstancias.

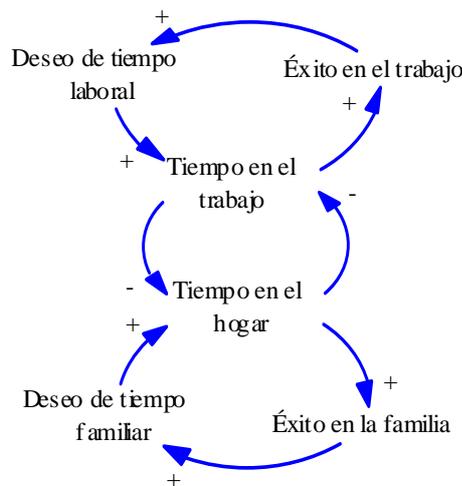


Figura 4. Ciclo ficticio en el arquetipo "Éxito para quien tiene éxito". Tomado de Senge (1990)

Descartando, pues, una inconsistencia lógica relacionada con la noción de *cambio* y con su representación matemática, discutimos a continuación dos hipótesis relacionadas con la aparición normal en DCC de ciclos directos y su prohibición en DN&F:

Hipótesis 1: *Los ciclos directos son realmente representaciones simplificadas de ciclos indirectos, que se pueden definir adecuadamente añadiendo la(s) relación(es) de tipo tasa-de-cambio que se requiera(n).*

Esta hipótesis se debe rechazar a partir del reconocimiento de que un ciclo directo da información diferente de la que da el ciclo indirecto resultante de simplemente añadir relaciones tipo tasa-de-cambio al diagrama. Tomemos, por ejemplo, los dos ciclos siguientes:

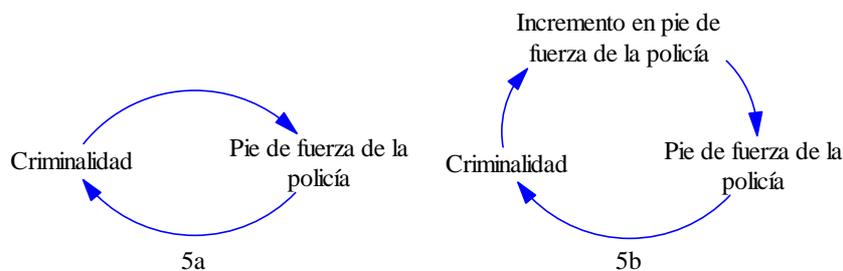


Figura 5. Ciclos directo e indirecto de policía y criminalidad

El ciclo indirecto en 5b aparece al añadir la variable "incremento en pie de fuerza de la policía" en medio de la relación entre "criminalidad" y "pie de fuerza de la policía". Pero notemos que los DCC en 5a y 5b se refieren a políticas diferentes: en el primer caso, un nivel determinado de criminalidad determinará directamente el pie de fuerza de policía del que se dispondrá. En el segundo caso, ese nivel de criminalidad determinará qué tanto pie de fuerza de policía se añadirá o restará del existente actualmente. Dado que representan dos políticas diferentes, y ambas en principio con sentido, no puede decirse entonces que el ciclo en 5a sea necesariamente una simplificación del ciclo en 5b.

Hipótesis 2: *Los ciclos directos son realmente representaciones incompletas de conjuntos de ciclos indirectos, que se pueden definir adecuadamente añadiendo nuevos ciclos de realimentación que se requieran.*

En principio, un ciclo directo puede traducirse a un conjunto de ciclos indirectos. Así, por ejemplo, la situación de criminalidad y policía de la figura 5a puede representarse mediante ciclos indirectos si se fuerza al diagrama a incluir la variable “incremento en pie de fuerza de la policía” y si se realizan luego los ajustes correspondientes, de la siguiente manera: si un valor dado de criminalidad determina el pie de fuerza nuevo que ahora tendrá la policía, el incremento neto se calcula entonces como este nuevo pie de fuerza menos el anterior, a lo largo del período de tiempo en el cual ocurre el incremento. Y esto significa que “incremento” depende también directamente de “pie de fuerza”. Este resultado de este procedimiento se ve en la figura 6a. Dado que este procedimiento se puede generalizar a cualquier relación causal, en principio siempre será posible representar mediante ciclos indirectos la misma información que lleva un ciclo directo, aunque ello conlleve la construcción de más ciclos<sup>2</sup>. Más aún, se podría hacer lo mismo con la variable criminalidad, como se ve en la figura 6b. De esta manera, tres posibles traducciones del DCC en 5a a diagramas que exclusivamente presenten ciclos indirectos, son las siguientes:

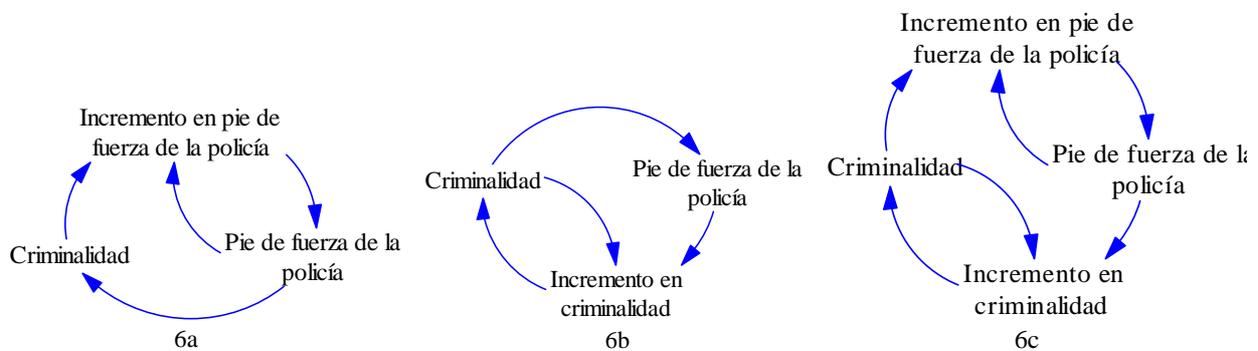


Figura 6. Traducciones posibles a DCC de ciclos indirectos, del ciclo directo del DCC en 5a

Este procedimiento puede verse, en términos de Richardson, como sacando a la luz a los “ciclos ocultos”, o ciclos que se han dejado sin representar (1986, p.165). Según esta idea, en la figura 6c se explicitan los ciclos “criminalidad- incremento en criminalidad- criminalidad” y “pie de fuerza- incremento en pie de fuerza- pie de fuerza”, que antes se encontraban ocultos. El término “oculto” conlleva una connotación de faltante o de incompleto. Sin embargo, nosotros creemos que esta connotación es incorrecta: la información que contiene el DCC en la figura 5a es incluso mayor que la de los DCC en las figuras 6a, 6b y 6c, debido a que existen múltiples posibilidades de interpretación de estos últimos que no coinciden con 5a. ¡Y la incertidumbre acerca de los comportamientos posibles que puede generar en todos los casos es la misma! (Ver siguiente sección).

En conclusión, no debemos ver a los ciclos directos como representaciones incompletas o simplificadas de estructuras causales expresadas con ciclos indirectos. Ellos son representaciones que en sí mismas tienen sentido. Aparte de tener presente la precaución acerca de los ciclos ficticios, nosotros creemos que existen dos preguntas que son más de fondo relacionadas con los ciclos directos e indirectos y que debemos intentar responder. La primera pregunta es acerca de la *utilidad* de las representaciones con ciclos directos. En las dos secciones que siguen (3 y 4) discutiremos este aspecto con relación a una premisa central de la dinámica de sistemas: la

<sup>2</sup> Es importante notar que este procedimiento no se puede realizar con relaciones analíticas, en las cuales los cambios en la variable origen producen *instantáneamente* cambios en la variable destino.

posibilidad de establecer conexiones entre estructura y comportamiento. La segunda pregunta concierne a la dinámica de sistemas cuantitativa, y es acerca de los criterios para definir si una variable debe ser representada como nivel –o, formulada alternativamente, si una relación causal debe ser representada mediante relaciones de tipo tasa-de-cambio. Aunque las implicaciones de nuestra discusión pueden ser mucho más amplias en su alcance, nosotros nos limitaremos a examinar si es necesario, y cuáles son las mejores maneras (más prácticas, más fáciles, más directas, más precisas, etc.) en las que un ciclo directo como el representado en 5a podría traducirse a ciclos indirectos que luego fácilmente se puedan traducir a un DN&F. Por ejemplo, ¿con qué criterio decidiríamos cuál representación es mejor entre los DCC de las figuras en 5a y 6? En la sección 5 exploraremos esta pregunta.

### 3. Conexiones estructura-comportamiento en ciclos directos e indirectos

Algunos elementos de estructura citados por diversos autores de la dinámica de sistemas, que sirven para explicar comportamientos, son las polaridades de los ciclos, las demoras (o retardos) y las acumulaciones. En cuanto a las polaridades de ciclos, se suele aceptar que, ceteris paribus, los ciclos de realimentación positiva producen comportamientos divergentes en sus variables y que los ciclos de realimentación negativa producen comportamientos convergentes (ver figura 7)<sup>3</sup>.

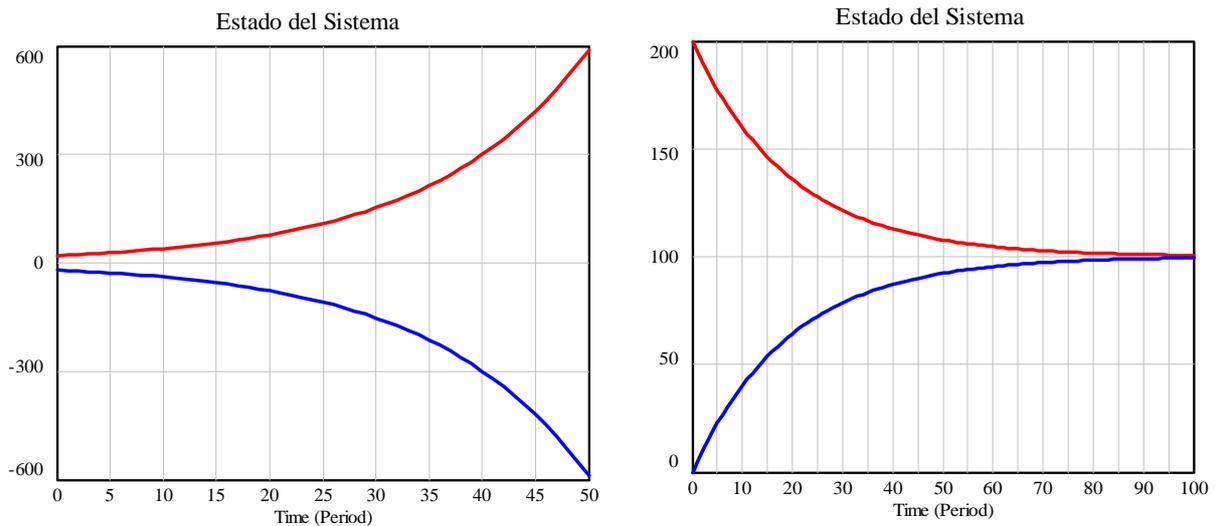


Figura 7. Comportamientos divergentes y convergentes

Una regla que se suele utilizar para determinar la polaridad de un ciclo de realimentación consiste en multiplicar las polaridades de las relaciones individuales que la constituyen. Esto conlleva las siguientes implicaciones (Sterman, 2000, p.145-146):

<sup>3</sup> Se sabe que en algunos casos los ciclos positivos y negativos producen comportamientos diferentes a los esperados (Ashford, 1995; Saleh & Davidsen, 2001). Se puede argumentar, sin embargo, que dichos comportamientos sólo ocurren en situaciones extremadamente improbables en las cuales los valores iniciales de las variables de estado (niveles) se encuentran en una relación fija determinada entre sí (en la situación más simple de un refuerzo de primer orden esto ocurre cuando la variable de estado está en equilibrio, y en este caso su comportamiento no será divergente). Y precisamente debido a esta extraordinaria improbabilidad e inestabilidad, dichas situaciones no son de mucho interés para la práctica de la dinámica de sistemas.

Si un ciclo de realimentación *directo*  $X-Y_1-Y_2-\dots-Y_n-X$  es positivo, entonces  $\partial X_s / \partial X_e \geq 0$ .  
 Si un ciclo de realimentación *directo*  $X-Y_1-Y_2-\dots-Y_n-X$  es negativo, entonces  $\partial X_s / \partial X_e \leq 0$ .

Donde  $X_s$  es la salida y  $X_e$  la entrada cuando se rompe analíticamente el ciclo en  $X$ . Esta formulación se refiere a cómo cambia  $X$  con respecto a sí mismo en algún tiempo anterior, como mínimo un instante ( $dt$ ) antes. Pero, como ya ha sido mostrado antes, estas interpretaciones no apoyan la idea de que los ciclos de realimentación positiva producirán, *ceteris paribus*, crecimiento o decrecimiento acelerados, ni la idea de que los ciclos de realimentación negativa producirán, *ceteris paribus*, crecimiento o decrecimiento desacelerados (Ashby, 1956; y Graham, 1977; citados en Richardson, 1995). Tampoco apoyan la idea de que unos produzcan crecimiento y que los otros pongan freno a ese crecimiento. Los ciclos directos de realimentación positiva entendidos así pueden producir crecimiento o decrecimiento; acelerado, desacelerado, lineal, o cualquier combinación.  $\partial X_s / \partial X_e \geq 0$  (según lo cual el ciclo es positivo), por ejemplo, sólo implica que si  $X$  ha crecido por causa de la realimentación en cuestión, entonces continuará creciendo; y  $\partial X_s / \partial X_e \leq 0$  (según lo cual el ciclo es negativo) que si  $X$  ha crecido por causa de la realimentación en cuestión, entonces luego tenderá a decrecer. Como lo ha señalado Graham (1977, citado en Richardson, 1995), un comportamiento divergente sólo se producirá si  $\partial X_s / \partial X_e > 1$ , y un comportamiento convergente si  $0 < \partial X_s / \partial X_e < 1$ . (Más estrictamente, será divergente si  $|\partial X_s / \partial X_e| > 1$  y convergente si  $|\partial X_s / \partial X_e| < 1$ .) Esto es, porque el término  $\partial X_s$  representa el nuevo cambio en la variable  $X$ , mientras que  $\partial X_e$  representa el anterior cambio en la misma variable. Un comportamiento es de crecimiento o decrecimiento acelerado si cada nuevo cambio en la variable es mayor, en valor absoluto, que el anterior.

Tomemos como ejemplo el caso de una adolescente muy orgullosa y obstinada, que actúa de forma más rebelde entre más presión sienta que sus padres ejercen sobre ella (ver fig. 8). A la vez, sus padres la presionarán más entre más sientan que ella se comporta de forma más rebelde.

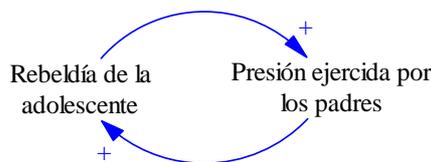


Figura 8. Ciclo directo de rebeldía y presión

Según la regla de la multiplicación de signos, éste es un ciclo de realimentación positiva, o ciclo de refuerzo. Para ver qué se puede concluir de este hecho, analicemos dos casos: 1) la rebeldía inicial de la adolescente está en un nivel alto; y 2) la rebeldía inicial de la adolescente está en un nivel medio. Inicialmente, también, la presión de los padres causada por la rebeldía de la adolescente será mayor en el caso 1 que en el caso 2 (debido a que la relación de "rebeldía" a "presión" es positiva). Y por tanto, también, la *nueva* rebeldía de la adolescente causada por la presión de los padres será mayor en el caso 1 que en el caso 2 (debido a que la relación de "presión" a "rebeldía" es positiva). Ésta es una comparación entre los casos 1 y 2; pero hasta ahí podemos concluir. Nada en el hecho de que ambas relaciones sean positivas sugiere que la rebeldía crecerá, y mucho menos que si hiciera, será de forma acelerada. Más bien, la nueva rebeldía será mayor de lo que hubiera sido si la rebeldía inicial hubiera sido menor; y será menor de lo que hubiera sido si la rebeldía inicial hubiera sido mayor. Incluso, la rebeldía y la presión pueden en este ejemplo disminuir con

el tiempo. Lo que sí sabemos es que, si disminuyen, lo harán más lentamente que si inicialmente la rebeldía y la presión hubieran sido menores. Y si aumentan, lo harán más rápidamente que si inicialmente la rebeldía y la presión hubieran sido mayores.

Para ilustrar esto matemáticamente, tomemos el ciclo directo X-Y-X representado en la figura 2 (arriba). Supongamos ahora que las ecuaciones que definen sus variables son  $X(t)=Y(t-\Delta t)$  y  $Y(t)=k \cdot X(t)$ . Con la regla de multiplicación de signos tenemos que si  $k > 0$  el ciclo será positivo, si  $k < 0$  el ciclo será negativo (porque  $k$  determina directamente el valor de  $\partial X_s / \partial X_e$ ), y si  $k = 0$  no habrá realimentación alguna. Fijando  $\Delta t = 1$  y  $X(t=0) = 1$ , el comportamiento para diferentes valores de  $k$  será el siguiente:

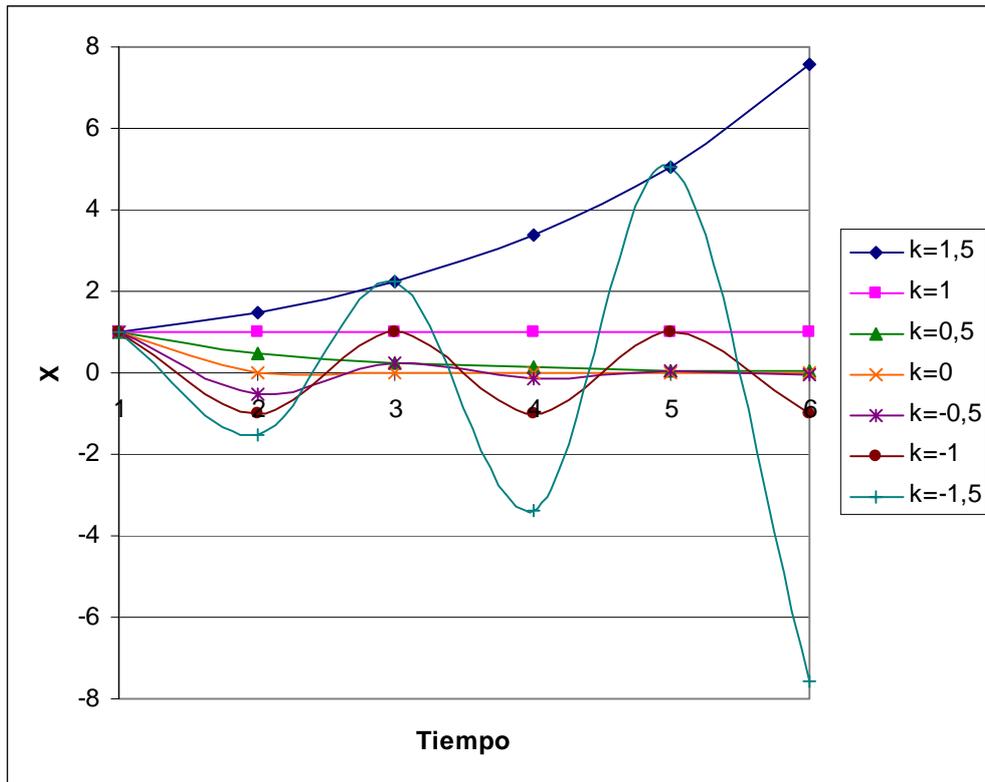


Figura 9. Comportamientos en un ciclo directo

Notemos que cuando  $k=0.5$ , aunque el ciclo sea de realimentación positiva según la regla de multiplicación de signos, el comportamiento es convergente. Y cuando  $k=-1.5$ , aunque el ciclo sea de realimentación negativa según la regla de multiplicación de signos, el comportamiento es divergente. Y esto nos lleva a una importante conclusión: la determinación de la polaridad de los ciclos en un DCC, según la regla de multiplicación de signos, **NO** nos ayuda a determinar si esa estructura causal producirá, ceteris paribus, comportamientos crecientes o decrecientes, y menos si serán lineales, acelerados o desacelerados.

Como lo mencionamos en la introducción a este artículo, ante dificultades como éstas Richardson (1995) propuso redefinir para ciclos de primer orden, “ciclo de realimentación positiva” como uno en el cual  $\partial(dX/dt)/\partial X > 0$ , y “ciclo de realimentación negativa” como uno en el cual

$\partial(dX/dt)/\partial X < 0$ <sup>4</sup>. Esta redefinición sí garantiza –salvo en los casos especiales a los cuales hacemos referencia arriba– divergencia y convergencia en el comportamiento de las variables de estado en ciclos positivos y negativos, respectivamente. Es importante resaltar que esta definición no se debe tratar de manera puramente comportamental, calculando a partir de los valores que efectivamente va tomando la variable  $X$  qué va pasando con  $\Delta(dX/dt)/\Delta X$  a medida que pasa el tiempo. La sugerencia de Richardson se debe entender como refiriéndose a que se debería poder encontrar que la relación *causal* que va de  $X$  a  $dX/dt$  es de cierta manera particular, para poder determinar si el ciclo es de refuerzo o de balance. En general, esta definición es útil para determinar la polaridad de los ciclos de realimentación de primer orden a partir de un DN&F. Richardson (1995) la generaliza luego para ciclos de órdenes superiores, así: considere un ciclo de realimentación compuesto por los niveles  $X_1, X_2, \dots, X_n$  conectados de la siguiente forma:  $dX_1/dt \rightarrow X_1 \rightarrow dX_2/dt \rightarrow X_2 \rightarrow \dots \rightarrow X_n \rightarrow dX_1/dt$ .

El siguiente esquema determina la polaridad del ciclo:

$$\left( \frac{\partial(dx_1/dt)}{\partial x_n} \cdot \frac{\partial(dx_2/dt)}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial(dx_3/dt)}{\partial x_2} \dots \frac{\partial(dx_n/dt)}{\partial x_{n-1}} \right) > 0 \rightarrow \text{Ciclo de realimentación positiva}$$

$$\left( \frac{\partial(dx_1/dt)}{\partial x_n} \cdot \frac{\partial(dx_2/dt)}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial(dx_3/dt)}{\partial x_2} \dots \frac{\partial(dx_n/dt)}{\partial x_{n-1}} \right) < 0 \rightarrow \text{Ciclo de realimentación negativa}$$

Sin embargo, esta definición no siempre garantiza que un ciclo positivo produzca un comportamiento divergente y un ciclo negativo un comportamiento convergente. Para ilustrar esto, considere el siguiente ejemplo: dos familias en conflicto que se disparan unas a otras causando la muerte de los integrantes de sus familias (este ejemplo se realizó con base en el ejemplo que presenta Richardson, 1986, p.167).

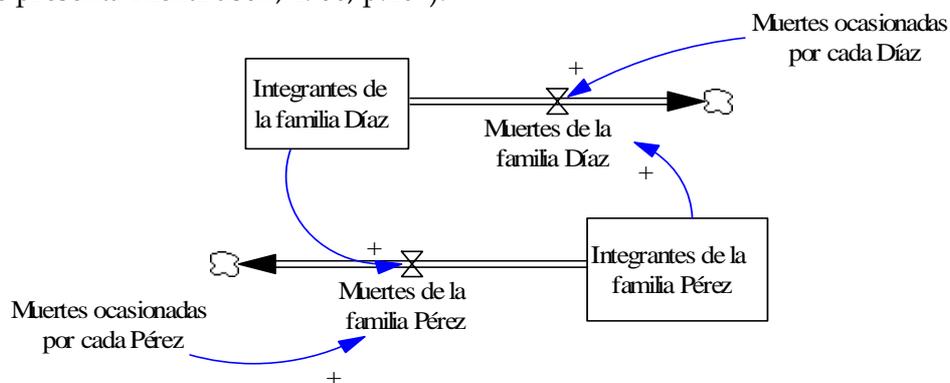


Figura 10. Diagrama de niveles y flujos de las familias en conflicto

De acuerdo con la definición de Richardson (1995) para ciclos de mayor orden, éste es un ciclo de realimentación positiva. Sin embargo, si se observa los comportamientos de las variables de estado se obtienen comportamientos convergentes. En este caso se consideró que las familias comenzaban con igual número de integrantes y por cada dos integrantes de una familia se ocasionaba la muerte de un integrante en la otra familia contrincante.

<sup>4</sup> Se puede argumentar que, teniendo en cuenta que un nivel ( $X$ ) puede tener varios flujos asociados, estrictamente no es necesario que el término que se deriva sea  $dX/dt$ , sino alguno de sus componentes aditivos.

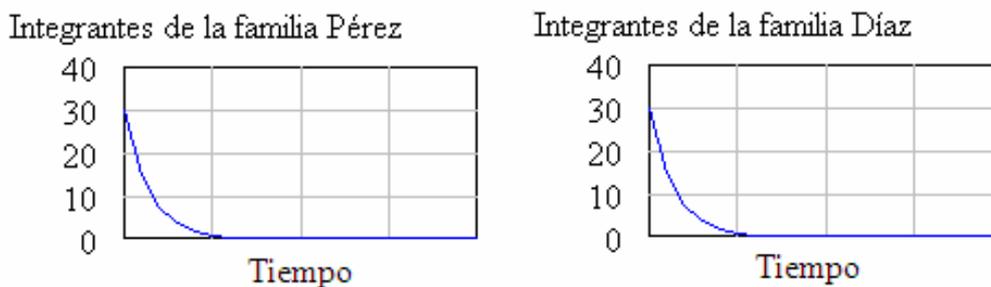


Figura 11. Comportamientos del ejemplo de las familias en conflicto

Por lo tanto, la definición de Richardson para definir un ciclo la polaridad de un ciclo de realimentación es útil solamente para ciclos de primer orden y su generalización a ciclos de mayor orden puede tener problemas en algunos casos, como se ilustró en el ejemplo anterior.

#### 4. Dinámica de sistemas cualitativa

Queremos en este capítulo discutir ahora las implicaciones para la dinámica de sistemas cualitativa de la discusión en el capítulo 3 sobre relaciones entre estructura y comportamiento. Comenzaremos con un recuento de la teoría y la práctica actual, para luego discutir brevemente cuáles caminos se cierran y cuáles podrían abrirse para la dinámica de sistemas cualitativa.

La modelación cualitativa se refiere a la construcción de diagramas de influencia y DCC para el análisis de sistemas sin el uso de la simulación computacional (Coyle, 1998). Comúnmente se asocia su uso con la capacidad para proveer entendimiento, para reconocer realimentación, y para promover el pensamiento sistémico y el aprendizaje organizacional. Igualmente se ha argumentado que es útil para cambiar percepciones y para crear lenguajes comunes, o al menos consensos (Vennix, 1996). Por otro lado, aunque es difícil encontrar en la literatura teorías o instrucciones concretas sobre *cómo* inferir comportamiento a partir de tales diagramas, algunos autores llegan a afirmar que la dinámica de sistemas cualitativa es un método auto-suficiente para inferir comportamientos a partir de estructura en algunos casos (Wolstenholme, 1982; 1999; Wolstenholme & Coyle, 1983). En particular, de acuerdo con la definición clásica de ciclo de refuerzo y balance basada en la multiplicación de signos, usualmente se sostiene que los ciclos de refuerzo producen comportamientos divergentes y que los ciclos de balance producen comportamientos convergentes (Coyle, 1996; Sterman, 2000; Vennix, 1996; Wolstenholme, 1990). Wolstenholme (1990) afirma que el comportamiento del modelo se puede estimar cualitativamente mediante dos maneras: en los casos "simples" afirma que se puede hacer identificando la polaridad de los ciclos de realimentación. Para los casos "más complejos" indica que se deben identificar los ciclos "mayores" de realimentación de información y que se deben seguir los efectos de los cambios de variables específicas de tasa de cambio a través del resto de las variables que conforman el ciclo. Esto se asocia con la llamada "simulación mental" en donde se argumenta que la identificación de relaciones de políticas en mapas causales permite "especular enfocadamente" para intervenir y rediseñar sistemas partiendo de dichos entendimientos ("insights"). El trabajo de Coyle representa otro ejemplo de cómo en la literatura de la dinámica de sistemas cualitativa se afirma que desde los DCC se pueden hacer algunas inferencias de comportamiento, sin explicar del todo cómo hacerlas (ver por ejemplo la discusión de Coyle (2000) sobre el colapso de la civilización Maya). En general, no se encuentra ninguna argumentación en torno a las implicaciones de que haya o no (implícita o explícitamente) tasas de cambio en los diagramas

causales. En general, los autores tienden a inferir comportamiento y a generalizar estructuras con base en la relación entre estructura-comportamiento clásica que como ya hemos visto puede tener problemas en algunos casos.

Una piedra angular del modelamiento cualitativo es el uso de los llamados arquetipos sistémicos. Varios textos del llamado “pensamiento sistémico” han identificado esta expresión con los mencionados arquetipos los cuales son asumidos como descriptores de patrones comunes de comportamiento, que proveen entendimiento asociando estos comportamientos con estructuras de realimentación (Braun, 2002; Kim, 1993, 1994, 1995). Wolstenholme (2003) afirma que los arquetipos han sido introducidos como maneras formales para clasificar estructuras que son responsables de patrones genéricos de comportamiento, en particular contra-intuitivos. De esta forma, permitirían anticipar el potencial de consecuencias no anticipadas incrementando así las posibilidades de alcanzar las metas y planes propuestos. En su discusión permite ver que en general asume que todo ciclo positivo está asociado con crecimiento y que todo ciclo negativo está asociado con control y balance. Esta afirmación también aparece en el popular trabajo de Senge, esta vez de forma explícita (1990, pp. 82-86).

Como hemos visto, la literatura sobre la dinámica de sistemas cualitativa presenta afirmaciones sobre la relación entre estructura y comportamiento, sin la precaución de reconocer las diferencias entre ciclos directos y ciclos indirectos y sus implicaciones para dicha relación. Es interesante que esto se refleja también en los DCC que efectivamente se presentan en dicha literatura como ilustración. En el Apéndice 1 se muestran algunos ejemplos tomados de la literatura de dinámica de sistemas cualitativa, así como algunos elementos de riesgo que pueden surgir al trabajar con ciclos directos sin la precaución de hacer esta distinción.

¿Qué opciones hay? Nosotros creemos que la dinámica de sistemas cualitativa es necesaria por un lado si valoramos una construcción y un uso inteligentes de los modelos de simulación, y por otro lado si consideramos que en la cotidianidad el pensamiento de las personas podría volverse mucho más poderoso o sofisticado si incorporara un entendimiento de las relaciones entre estructura y comportamiento. Sin embargo, nuestra discusión anterior junto con el trabajo de Richardson (1985 y 1999) demuestra que se debería cerrar el camino tomado hasta el momento por muchos en el que de forma no precavida se atribuye convergencia o divergencia a los comportamientos de las variables dependiendo de si ellas se encuentran en ciclos de balance o de refuerzo en los DCC. Algunos posibles nuevos caminos que se podrían abrir para la dinámica de sistemas cualitativa, sea que se base en arquetipos sistémicos o no, son los siguientes:

Una dinámica de sistemas cualitativa basada sólo en la noción de realimentación. En este caso los DCC pueden ser apropiados; pero no se identificarían en ellos los balances ni los refuerzos existentes ya que estas dos nociones dejarían de tener significado o utilidad. Dado que aquí no se podría relacionar estructura con comportamiento, una pregunta central para investigación en el futuro sería sobre el tipo de conocimiento nuevo sí podríamos alcanzar, apropiadamente, gracias a la noción de realimentación.

Una dinámica de sistemas cualitativa basada en diagramas de influencia o DN&F. Los diagramas de influencia ya han sido propuestos y utilizados antes (Coyle, 1996), y consisten en diagramas que hacen explícitas las diferencias entre flujos materiales y flujos de información. Los flujos materiales están asociados directamente a las cadenas de niveles y flujos, y por lo tanto a las relaciones de tipo tasa-de-cambio. Esto permitiría diferenciar entre ciclos directos y ciclos indirectos, y tener por

lo tanto en cuenta sus diferencias. En este sentido, proveerían una información similar a la de los DN&F. Recordemos, sin embargo, que en este momento ni siquiera para ciclos indirectos existe una adecuada formulación de elementos que de una manera consistente muestren cómo son las relaciones entre estructura y comportamiento. (Ver nuestra discusión sobre lo inadecuado incluso de la reformulación de Richardson, en el capítulo 3.) Como mostraremos en el capítulo siguiente, tampoco es evidente aún cuándo una variable debe ser modelada como un nivel y cuándo como una variable auxiliar, y por lo tanto tampoco es evidente de qué orden debe ser un ciclo. Es necesaria por lo tanto entonces mediante investigación intentar responder a la pregunta sobre la naturaleza de dichas relaciones. En cuanto a los ciclos directos, vemos dos opciones generales: i) investigar rigurosamente sus relaciones con comportamiento, para así poderlos usar en procesos de pensamiento sistémico; y ii) construir procesos para transformarlos en ciclos indirectos, lo cual nos remite al punto anterior (ver capítulo 5 a continuación para una discusión sobre dichas transformaciones.)

Una dinámica de sistemas cualitativa basada en eventos en lugar de variables. Éste es un camino que implicaría una reformulación radical de la forma de trabajar con causalidad con respecto al esquema actual de la dinámica de sistemas (que trabaja con variables). Requiere, también, de un programa de investigación mucho más lejano a lo existente actualmente alrededor de la dinámica de sistemas. En parte por esa razón, no lo explicaremos en detalle aquí, y nos limitaremos a mencionarlo brevemente. Este camino parte de dos observaciones relacionadas: i) La intuición humana sobre la causalidad, al menos en Occidente, parece amoldarse más fácilmente a un lenguaje de eventos que a un lenguaje de variables; y ii) algunos de los errores inferenciales cometidos en la dinámica de sistemas cualitativa, tales como los que hemos discutido arriba, podrían explicarse posiblemente en términos de la aplicación de criterios de variables en diagramas construidos a partir de eventos. En todo caso, se requeriría de investigación que responda a la pregunta sobre las posibilidades y las limitaciones de utilizar un lenguaje de eventos para entender la causalidad y para derivar de ahí entendimientos sobre la realimentación y el comportamiento.

## **5. Ciclos indirectos y dinámica de sistemas cuantitativa**

La segunda pregunta formulada al final de la sección 2 de este artículo se refería al criterio para definir, al modelar cuantitativamente ciclos directos, si alguna variable debe ser representada como nivel, o, en otras palabras, si en la representación de una relación causal deben utilizarse relaciones tasa-de-cambio. Si bien nuestra exploración de este asunto surge de explorar los ciclos de realimentación directos —que podrían en principio no necesitar niveles ni flujos—, nosotros creemos que tiene implicaciones que van más allá de esto y que tienen que ver con los procedimientos más básicos en dinámica de sistemas como la construcción de modelos de simulación. Como lo mencionamos en la introducción a este artículo, nuestro análisis es exploratorio y lleno de nuevas preguntas.

Comenzaremos examinando el ejemplo de criminalidad y policía formulado en la sección 2. Supongamos que el ciclo directo de la figura 5a es una representación correcta de alguna situación problemática real, en cuanto a que las dos siguientes son características de la situación representada:

- o La política implementada en dicha situación consiste en tener un pie de fuerza determinado para responder a la criminalidad existente en un momento dado (relación de “criminalidad” a “pie de fuerza”).
- o La magnitud de la criminalidad que va a existir en un momento dado dependerá del tamaño del pie de fuerza de la policía (relación de “pie de fuerza” a “criminalidad”).

¿Con qué criterio podría decidirse si alguna de estas dos variables debe ser representada como un nivel? Hay al menos cuatro elementos comunes que se encuentran en los textos consultados, y que podrían servir como criterio para definir qué variables son niveles: la noción de *acumulación*, la “prueba de la fotografía” (“snapshot test”), las variables de estado, y las nociones de *memoria* e *inercia*.

La noción de *acumulación*. Una variable debe representarse como un nivel –según dice el conocimiento aceptado en dinámica de sistemas– si corresponde a una acumulación; y como un flujo si corresponde a adiciones o sustracciones de una acumulación. Ésta parece ser, además, una categoría ontológica de las variables, según se ve en la siguiente afirmación de Richmond : “Piense en esto... ¡Las acumulaciones están en todas partes! La comida en su estómago, El dinero en su billetera. El conocimiento en su cabeza. El amor en su corazón. Todas son acumulaciones. Todas han surgido y han decaído, han crecido y han decrecido, mientras su vida se desarrolla” (2000, p.2-1, traducción nuestra). Existen algunas variables que son recurrentes en la literatura como ejemplos de niveles: “inventario”, “población”, y “empleados”, entre otras. Ello sugeriría en nuestro ejemplo que, por su similitud con los empleados, “pie de fuerza de la policía” debe ser un nivel. Sin embargo, hay que notar que muchas variables que en ocasiones efectivamente son representadas como niveles –y principalmente las intangibles– no se refieren a algo que intuitivamente entendamos como acumulación. El problema que aparece al no corresponder a la intuición consiste en que no puede servir del todo como criterio, o al menos no siempre. Pero de manera más contundente se ve que *acumulación* **NO** es una categoría ontológica en el hecho de que una misma variable puede, en dos modelos diferentes o incluso en un mismo modelo, ser simultáneamente un nivel y un flujo. Eso depende de los propósitos del modelo y de la situación que se esté modelando. El siguiente ejemplo de movimiento uniformemente acelerado (por ej., una caída libre), en el cual “velocidad” toma el papel de nivel y de flujo simultáneamente, ilustra esto:

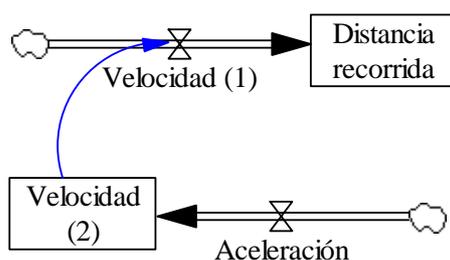


Figura 12. “Velocidad” como nivel y flujo al mismo tiempo

Esta dependencia de los propósitos y del contexto para definir los niveles en un modelo sugiere que la noción de acumulación no debe entenderse como una categoría ontológica. Y si esto es así, la similitud de “pie de fuerza” con “empleados” no debe tomarse como criterio para definirla como nivel.

La “prueba de la fotografía” (“snapshot test”). Se utiliza para ayudar a los aprendices a distinguir entre niveles y flujos. En palabras de Vennix, “los niveles en un sistema pueden identificarse imaginando que los procesos de flujos se detienen como si se tomara una fotografía del sistema. Lo que se puede ver en esta ‘fotografía estática’ son los niveles del sistema” (1996, p.70, traducción nuestra). El mismo procedimiento de ayuda aparece en los textos de otros autores (Serman, 2000; Richmond, 2000). En el ejemplo de criminalidad y policía una clasificación basada en este criterio sugeriría que “pie de fuerza” sería un nivel, mientras que “criminalidad” –que es una tasa que tiene una dimensión temporal– sería un flujo: al tomar la foto, puedo contar la cantidad de policías pero no la cantidad de crímenes que *se están cometiendo* en ese preciso momento. Según esto, una variable como “cantidad acumulada de crímenes” sí sería un nivel (aunque posiblemente no de interés). Pero notemos que el mismo ejemplo del movimiento acelerado de la figura 12 nos muestra que ese hecho por sí mismo no es razón suficiente para no definir a “criminalidad” como un nivel. Concluimos, entonces, que la prueba de la fotografía no es un criterio confiable para determinar cuáles variables deben representarse como niveles y cuáles como flujos.

Las variables de estado. Se ha dicho que las variables de estado de un sistema se representan con niveles. Forrester, por ejemplo, como apelando a una definición, dice que “el término ‘nivel’ se usa (...) para referirse a un estado o condición del sistema” (1968, p.1-7, traducción nuestra); mientras que los flujos estarían asociados a las acciones que se realizan para cambiar el estado del sistema. Lo mismo aparece en textos de otros autores. Teniendo en cuenta que se acepta que una variable de estado es la que caracteriza el estado del sistema independientemente de cómo se llegó a él, tanto “pie de fuerza” como “criminalidad” pueden considerarse variables de estado. Este resultado, sin embargo, entra en contradicción con el criterio de la prueba de la fotografía. Ahora, ¿por qué pensar que las variables de estado en dinámica de sistemas deben formularse como niveles? En la literatura consultada no hemos encontrado una respuesta a esta pregunta. Por ejemplo Forrester sólo afirma sin argumentar, lo siguiente:

*El nivel actual del sistema no depende de las acciones actuales sino que es una acumulación de todas las acciones anteriores. Por ejemplo, considere un tanque que está siendo llenado con agua. La altura del agua en el tanque es el nivel del sistema. El nivel depende de la acumulación producida por los flujos pasados de agua pero no está determinado por la rapidez con la que se está añadiendo agua en este instante. (1968, p.1-10, traducción y énfasis nuestros)*

Pero no existe ninguna razón para asegurar que una variable que caracterice al sistema siempre necesariamente será el producto de una acumulación. En la literatura, incluso, se pueden encontrar casos de variables que son representadas mediante convertidores, que caracterizan el estado actual del sistema y que por tanto deben ser consideradas como variables de estado. Por ejemplo, “consumo” y “producto nacional bruto” han sido formuladas por Richardson como variables auxiliares en un modelo económico (1995, pp.73-74).

Las nociones de memoria e inercia. Se sugiere que los niveles, en cuanto acumulaciones, son los que permiten que haya memoria en los sistemas. A su vez, la memoria permite que exista inercia y que el futuro dependa del pasado y no sólo del presente. Entendiendo que en las relaciones causales – aunque no en las analíticas– existe una demora entre la ocurrencia de cambios en la variable origen (causa) y su repercusión en la variable destino (efecto), concluimos que *en toda relación causal es necesario que haya memoria en el sistema, y que habrá por lo tanto inercia.* Ahora, cuando estas demoras debidas a la causalidad son directas (tipo “tubería”), realmente lo que se necesita no es acumular nada, sino llevar la cuenta de los valores anteriores de las variables implicadas. De esta

manera, suponiendo que en nuestro ejemplo de policía y criminalidad el DN&F es el mismo que el que aparece en la figura 5a, ambas variables pueden modelarse como auxiliares o convertidores<sup>5</sup>. Y en este sentido, *no es necesario que en toda realimentación exista al menos un nivel*. Estrictamente hablando, para las demoras suavizadas tampoco es necesario acumular nada, por cuanto lo que se requiere es lo mismo que en el caso de las demoras tipo “tubería”, aunque de manera más compleja. Sin embargo, la suavización puede construirse en modelos de dinámica de sistemas —y usualmente se construye— mediante niveles. ¡Y aquí aparece un primer elemento posiblemente prometedor para definir criterios para establecer cuáles variables se pueden correctamente representar como niveles, al intentar modelar cuantitativamente un ciclo directo! Suponiendo que ambas relaciones causales en nuestro ejemplo de policía y criminalidad son suavizadas en el tiempo, tendríamos que una representación correcta de niveles y flujos del DCC en 5a sería la siguiente:

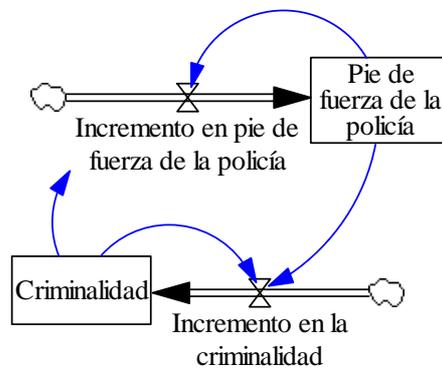


Figura 13. DN&F completo de la situación de policía y criminalidad, con relaciones suavizadas

Ahora, no necesariamente eso significa que otras representaciones siempre necesariamente sean incorrectas. Supongamos ahora que el tiempo en el que se sienten las repercusiones de una variable sobre la otra es significativamente mayor que el tiempo en el que se sienten las repercusiones de la relación contraria. En ese caso, sería razonable simplificar el modelo y dejarlo de alguna de las dos siguientes maneras (dependiendo de cuál demora es despreciable en comparación con la otra):

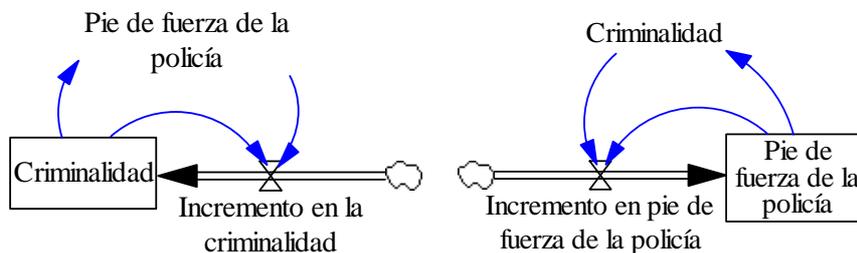


Figura 14. DN&F simplificados de la situación de policía y criminalidad, con relaciones suavizadas, de demoras significativamente diferentes

De forma interesante, vale la pena resaltar que en esta propuesta efectivamente estamos desplazando, de la variable a la relación causal, la característica central que determina si se deben

<sup>5</sup> Por esta razón, los nombres “convertidor” y “variable auxiliar” pierden sentido y deberían ser reemplazados.

emplear niveles en el modelo. Es decir, al menos en los casos presentados al intentar modelar cuantitativamente ciclos directos, se obtuvo que es *la naturaleza de las relaciones causales con las variables que la preceden la que determina si una variable debe ser modelada como un nivel, y no la naturaleza de la variable en sí misma.*

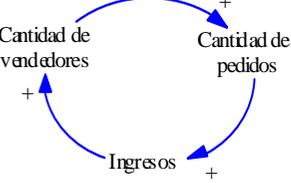
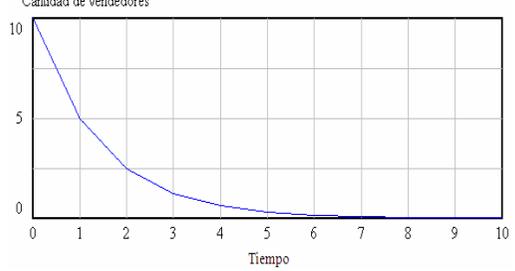
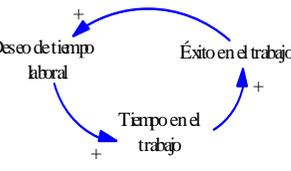
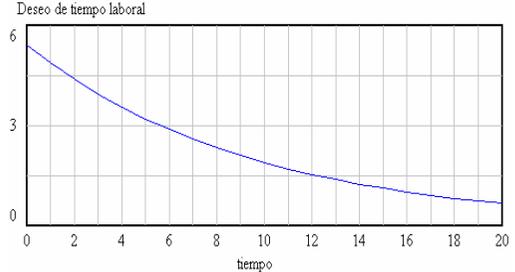
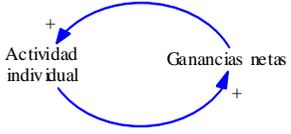
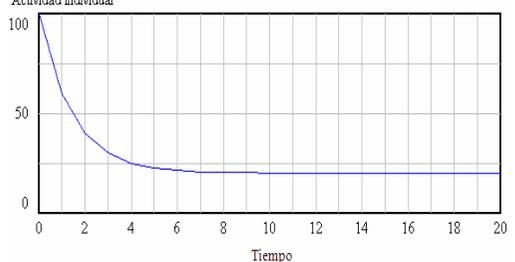
## **6. Comentarios finales**

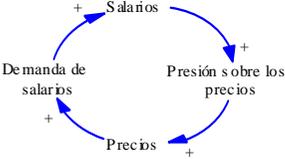
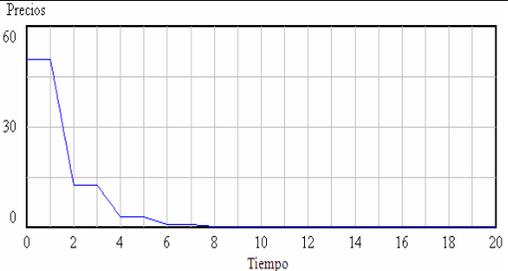
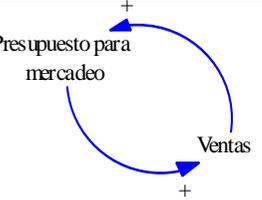
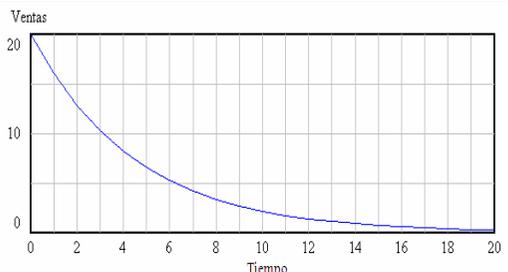
Nuestra discusión en este artículo se ha centrado en el tratamiento de los ciclos directos de realimentación. Hemos argumentado aquí que ellos deben ser tenidos seriamente en cuenta como representaciones completas que tienen sentido, y no como simplificaciones incompletas de estructuras más complejas de ciclos indirectos. Hemos mostrado también que su identificación es relevante para una construcción conceptual sólida de relaciones entre estructura y comportamiento, que permita contar con una adecuada dinámica de sistemas cualitativa. Para este propósito, mencionamos además tres posibles caminos que se podrían tomar, comentando el tipo de investigación que se requeriría en cada caso para hacerlos posibles. Por último, discutimos cómo los ciclos directos pueden convertirse en ciclos indirectos, en caso de que esto se requiera, lo cual nos llevó a algunas nuevas preguntas sobre la definición de “nivel” y de “variable auxiliar”.

Nosotros creemos que esta discusión es importante, en la medida en la que contribuye en la enorme tarea de construir y aclarar las posibilidades y limitaciones de una dinámica de sistemas cualitativa. Y vale la pena decir que en esta exploración, aunque es de alguna manera se haya convertido en un cliché, entre más hemos ido aprendiendo, más nos hemos ido dando cuenta de todo lo que realmente no sabemos. Pero este reconocimiento ha ido posiblemente formando nuestra posición de un modo más sólido, aunque más escéptico y crítico también. Es este escepticismo crítico lo que creemos y esperamos que pueda llegar a construir una dinámica de sistemas cualitativa sólida en el futuro.

## Apéndice 1

### Ejemplos tomados de la literatura de dinámica de sistemas cualitativa y el riesgo de trabajar con ciclos directos sin la precaución de hacer esta distinción

Estructura	Análisis en la literatura	Caso particular contrario	Comportamiento del caso particular	Ecuaciones
 <p>Diagrama de ciclo de refuerzo con variables: Cantidad de vendedores, Cantidad de pedidos, Ingresos. Las flechas indican relaciones positivas (+).</p>	<p>De acuerdo con Senge (1990) este ciclo produce un crecimiento rápido (p.152).</p>	<p>Considere la siguiente política de una compañía: por cada dos unidades monetarias de ingreso del periodo anterior, ésta decide tener un vendedor dentro de su compañía. Adicionalmente, por cada vendedor dentro de su compañía se tiene un pedido y los ingresos son iguales al número de pedidos por una unidad monetaria que éste genera como ingreso.</p>	 <p>A pesar de ser un ciclo llamado tradicionalmente de "refuerzo" o amplificador, en este caso en particular lo que obtenemos es un comportamiento convergente. No se obtiene un comportamiento divergente. Mayores ingresos garantizan una mayor cantidad de vendedores de la que habría si los ingresos hubieran sido menores; no obstante, no garantizan una mayor cantidad de vendedores con respecto al periodo anterior.</p>	<p>Cantidad de pedidos (t) = Cantidad de vendedores (t)</p> <p>Ingresos (t) = Cantidad de vendedores (t)</p> <p>Cantidad de vendedores (t) = 0.5*Ingresos (t-1)</p> <p>Cantidad de vendedores (0) = 10</p>
 <p>Diagrama de ciclo de refuerzo con variables: Deseo de tiempo laboral, Éxito en el trabajo, Tiempo en el trabajo. Las flechas indican relaciones positivas (+).</p>	<p>Este ciclo representa un proceso reforzador del tiempo y el compromiso laboral. De acuerdo con Senge (1990): más tiempo lleva a mayor éxito, lo cual lleva a oportunidades más interesantes y más deseo de pasar más tiempo en el trabajo (pág. 381).</p>	<p>Suponga que el éxito laboral está determinado directamente por el tiempo en el trabajo, sin embargo, solamente el 90% del tiempo del trabajo es productivo y por lo solamente éste produce éxito laboral (medido en unidades de éxito). El tiempo deseado incrementa por cada unidad adicional de éxito. Por último el tiempo en el trabajo es el tiempo deseado del periodo inmediatamente anterior.</p>	<p>De acuerdo con la dinámica de sistemas cualitativa este ciclo de "refuerzo" produce un crecimiento o un decrecimiento desestabilizador. Sin embargo, en este caso en particular se puede ver el deseo de tiempo laboral converge a cero. Esto se debe a que el diagrama solo dice que mayor deseo del tiempo laboral, mayor tiempo en el trabajo, sin embargo, esto no implica que el tiempo dedicado sea cada vez mayor.</p> 	<p>Deseo de tiempo laboral (t) = Éxito en el trabajo (t)</p> <p>Tiempo en el trabajo (t) = Deseo de tiempo laboral (t-1)</p> <p>Éxito en el trabajo (t) = 0.9* Tiempo en el trabajo (t)</p> <p>Tiempo en el trabajo (0) = 6</p>
 <p>Diagrama de ciclo de refuerzo con variables: Actividad individual, Ganancias netas. Las flechas indican relaciones positivas (+).</p>	<p>Este ciclo usualmente asociado al arquetipo tragedia de los comunes, representa como la actividad individual, produce mayor ganancias, produciendo una mayor actividad individual. De acuerdo con el análisis clásico este ciclo de realimentación producirá</p>	<p>Considere el caso en el cual la actividad individual es la producción de un artículo específico. Por cada unidad vendida se obtiene una unidad monetaria de ganancias. Adicionalmente, la actividad individual depende de un componente fijo, siempre se producen 10 artículos, y un componte</p>		<p>Ganancias netas (t) = Actividad individual (t)</p> <p>Actividad individual (t) = 0.5*Ganancias netas (t-1) + 10</p> <p>Actividad individual (0) = 100</p>

	<p>un crecimiento de las ganancias y la actividad individual, al menos en el corto plazo.</p>	<p>variable asociado a las ganancias obtenidas en el periodo inmediatamente anterior, por cada dos unidades monetarias obtenidas en el periodo anterior se produce un artículo adicional.</p>	<p>Al considerar solamente este ciclo de "refuerzo", éste produce un comportamiento convergente. La producción se estabiliza en el componente fijo debido a que el componente variable cada vez es menor. En este caso en particular no se afecta los medios productivos, no se produce la acumulación de maquinaria u otro medio productivo que afecta la producción de periodos subsiguientes y produzca que la actividad individual sea mayor con respecto al periodo anterior, simplemente a un nivel de ganancias se produce una cierta cantidad de artículos.</p>	
	<p>Goodman (1989) presenta este ciclo como la espiral de precios-salarios y lo explica como sigue: los trabajadores preocupados por los precios presionan por alza en sus salarios. Por otra parte los productores incrementan los precios para cubrir los costos laborales adicionales. El ciclo sigue así y las cuatro variables crecen sin límite (pág. 16). El autor asegura que el crecimiento exponencial caracteriza la mayoría de ciclos positivos (pág. 17).</p>	<p>Considere que los salarios determinan los precios del siguiente periodo en un factor de 0.5. Igualmente los precios los precios determinan los salarios del periodo siguiente en un factor de 0.5.</p>	 <p>En este caso en particular los precios y los salarios no crecen sin límite como se había predicho. A pesar que a mayores salarios, los precios son mayores, esto no implica que los salarios serán mayores con respecto al periodo inmediatamente anterior. El comportamiento que se obtiene no es de crecimiento (no es divergente).</p>	<p>Precios(t) = 0.5*Salarios (t-1)  Salarios (t) = 0.5*Precios (t-1)  Precios (0) = 50  Salarios (0) = 100</p>
	<p>Este ciclo de realimentación se presenta como parte del arquetipo de límites al crecimiento. Este ciclo de realimentación se identifica como el motor de crecimiento (Kim, 1994).</p>	<p>Considere que una compañía siempre dedica el 40% de sus ventas del periodo inmediatamente anterior (medido en unidades monetarias) al presupuesto para el mercadeo del producto. Adicionalmente, por cada unidad monetaria invertida en el presupuesto de mercadeo se obtienen dos unidades monetarias en ventas.</p>	 <p>De nuevo aunque este ciclo de realimentación se catalogue como un motor de crecimiento, no bajo todas las condiciones posibles este ciclo produce un comportamiento divergente. El diagrama de ciclos causales permite decir que entre mayores ventas, se realizará una mayor inversión en mercadeo. Sin embargo, esto no significa que el presupuesto para mercadeo será mayor con respecto al periodo anterior.</p>	<p>Ventas (t) = 2*Presupuesto para mercadeo (t)  Presupuesto para mercadeo (t) = 0.4*Ventas (t-1)  Presupuesto para mercadeo (0) = 10</p>

## Referencias

- Ashby, W. R. (1956). *Introduction to Cybernetics*. New York: Wiley.
- Ashford, A. (1995). Unexpected behaviors in higher-order positive feedback loops. MIT System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.
- Braun, W. (2002). The system archetypes. Disponible en línea en: [http://wwwu.uni-klu.ac.at/gossimit/pap/sd/wb\\_sysarch.pdf](http://wwwu.uni-klu.ac.at/gossimit/pap/sd/wb_sysarch.pdf).
- Coyle, G. (1996). *System Dynamics Modelling: A Practical Approach*. London: Chapman & Hall.
- Coyle, G. (1998). The practice of system dynamics: milestones, lessons and ideas from 30 years experience. *System Dynamics Review*, 14(4), 343-365.
- Coyle, G. (2000). Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. *System Dynamics Review*, 16(3), 225-244.
- Dyner, I. (1993). *Dinámica de Sistemas y Simulación Continua en el Proceso de Planificación*. Bogotá: Colciencias.
- Forrester, J. W. (1968). *Principles of Systems*. Cambridge: Wright-Allen Press (1971).
- Goodman, M. (1989). *Study Notes in System Dynamics*. Waltham: Pegasus Communications.
- Graham, A. K. (1977). *Principles of the Relationship Between Structure and Behavior of Dynamic Systems*. Tesis doctoral sin publicar, MIT, Cambridge.
- Kim, D. (1993). *Systems Archetypes I*. Cambridge, MA: Pegasus Communications.
- Kim, D. (1994). Predicting behavior using systems archetypes. *The Systems Thinker*, 5(8), 5-6.
- Kim, D. (1995). Systems archetypes as dynamic theories. *The Systems Thinker*, 6(5), 6-9.
- Mejía, A., & Díaz, G. (2006). *Tipos de arcos y hacia dónde disparan: Sobre la naturaleza y las posibilidades de los arquetipos*. Artículo presentado en el 4o. Congreso Anual del Capítulo Latinoamericano de la Sociedad de Dinámica de Sistemas, Cancún.
- Richardson, G. (1986). Problems with causal-loop diagrams. *System Dynamics Review*, 2(2), 158-170.
- Richardson, G. (1995). Loop polarity, loop dominance, and the concept of dominant polarity. *System Dynamics Review*, 11(1), 67-88.
- Richardson, G. (1999). Reflections for the future of system dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 440-449.
- Richmond, B. (2000). *An Introduction to Systems Thinking*. Hanover: High Performance Systems.
- Saleh, M., & Davidsen, P. (2001). The origins of behavior patterns. En las Memorias de la Conferencia Internacional de Dinámica de Sistemas, Atlanta, GA.
- Senge, P. (1990). *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Nueva York: Doubleday.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston, MA, USA: McGraw-Hill.
- Vennix, J. (1996). *Group Model Building: Facilitating Team Learning Using System Dynamics*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Wolstenholme, E. F. (1982). System dynamics in perspective. *Journal of the Operational Research Society*, 33, 547-556.
- Wolstenholme, E. F. (1990). *System Enquiry. A System Dynamics Approach*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Wolstenholme, E. F. (1999). Qualitative vs quantitative modelling: the evolving balance. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 422-428.

- Wolstenholme, E. F. (2003). Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics. *System Dynamics Review*, 19(1), 7-26.
- Wolstenholme, E. F., & Coyle, R. G. (1983). The development of system dynamics as a methodology for system description and qualitative analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 34, 569-581.