

Simulación Aplicada a la Logística

Lectura 6

Dinámica de Sistemas

Profesor:

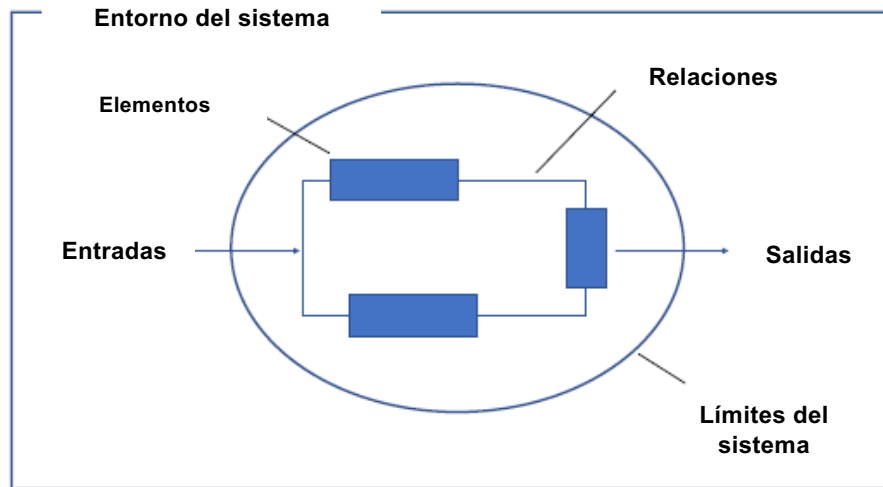
Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ ricardo.caballero@utp.ac.pa

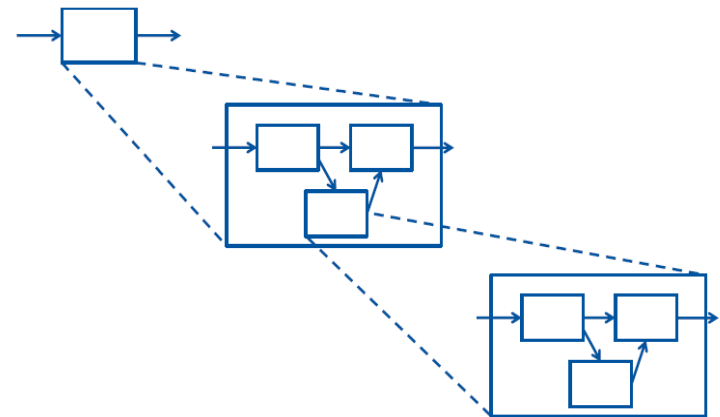


Sistema

- Conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo.
- Los elementos también pueden considerarse como subsistemas compuestos de otros elementos.
- La parte más pequeña de un sistema es el elemento del sistema.
- Los sistemas están definidos por límites.



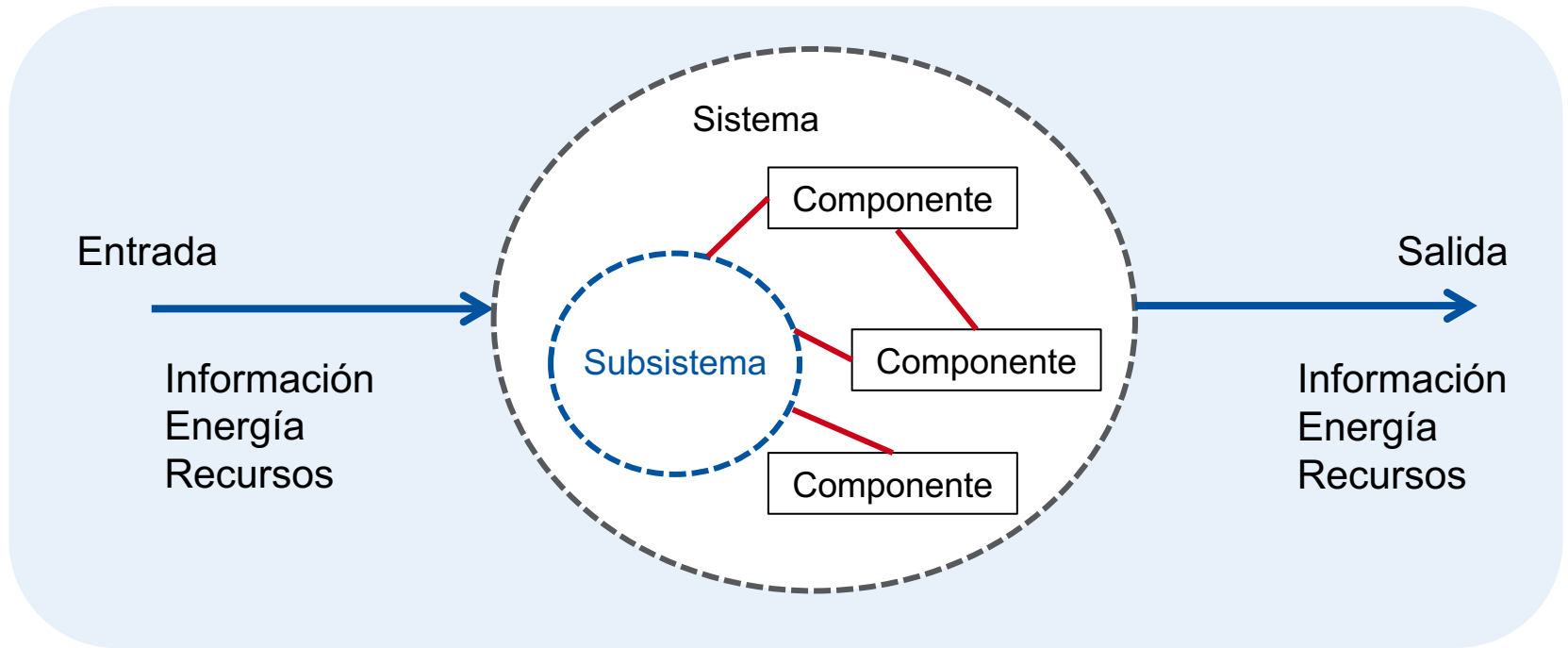
Representación de un sistema



Descomposición de elementos en subsistemas

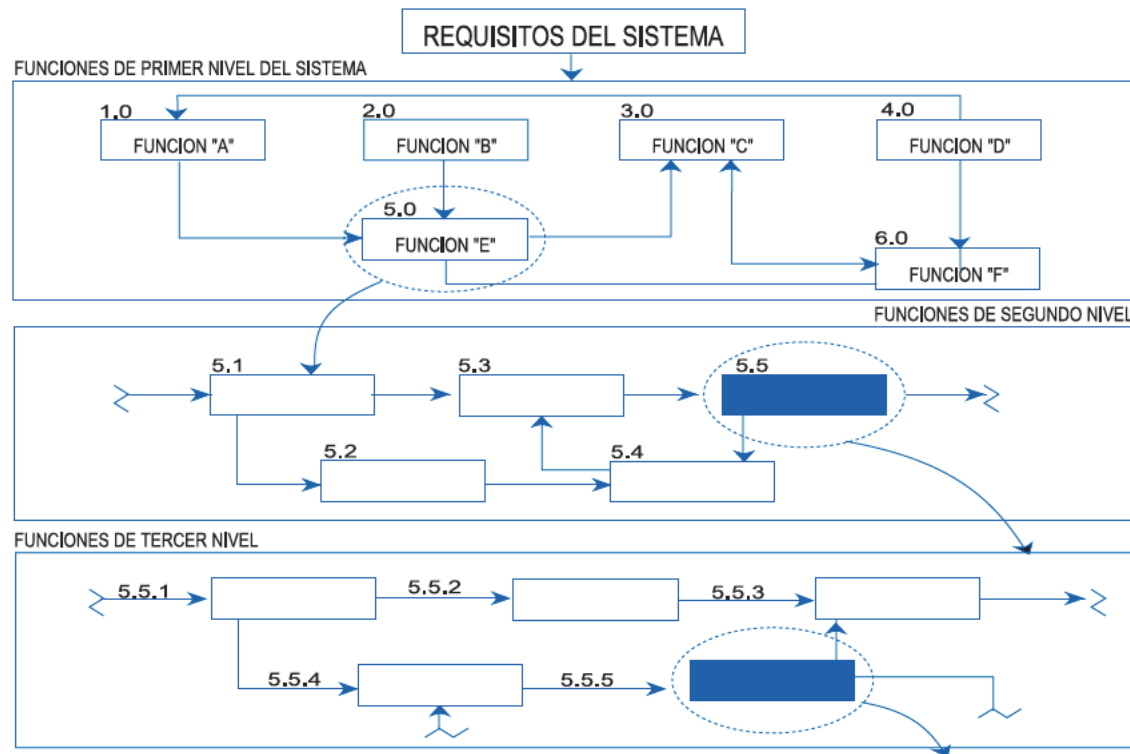
Variables del sistema

- Las variables son condiciones cuyos valores se crean y modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones.
- Las variables pueden ser de tipo continuas o discretas.
- Existen variables de entradas que afectan el comportamiento general del sistema.



Descomposición funcional del sistema

El análisis funcional constituye el proceso iterativo de estructurar o descomponer los requisitos del nivel sistema, a los subsistemas, y tan abajo en la estructura jerárquica como sea necesario para identificar los recursos específicos y los distintos componentes del sistema.



El entorno actual de un sistema

La complejidad de los sistemas actuales va en aumento con la aparición de nuevas tecnologías en un entorno que cambia sin cesar



Elementos de un sistema



Pasos para el proceso de modelado

1

Articulación del problema

- **Selección de temas:** ¿Cuál es el problema? Por qué es un problema?
- **Variables clave:** ¿Cuáles son las variables y conceptos clave que debemos considerar?
- **Horizonte de tiempo:** ¿Qué tan lejos en el futuro deberíamos considerar? ¿Qué tan atrás en el pasado se encuentran las raíces del problema?
- **Definición dinámica del problema (modos de referencia):** ¿Cuál es el comportamiento histórico de la clave?

2

Formulación de la hipótesis

- **Generación de hipótesis inicial:** ¿Cuáles son las teorías actuales del comportamiento problemático?
- **Enfoque endógeno:** Formular una hipótesis dinámica que explique la dinámica como consecuencias endógenas de la estructura de retroalimentación.
- **Mapeo:** Desarrolle mapas de estructura causal basados en hipótesis iniciales, variables clave, modos de referencia y otros datos disponibles, utilizando herramientas como: diagramas causales

3

Formulación de modelo de simulación

- Especificación de estructura, reglas de decisión.
- Estimación de parámetros, relaciones de comportamiento y condiciones iniciales.
- Prueba la coherencia con el propósito y el límite.

4

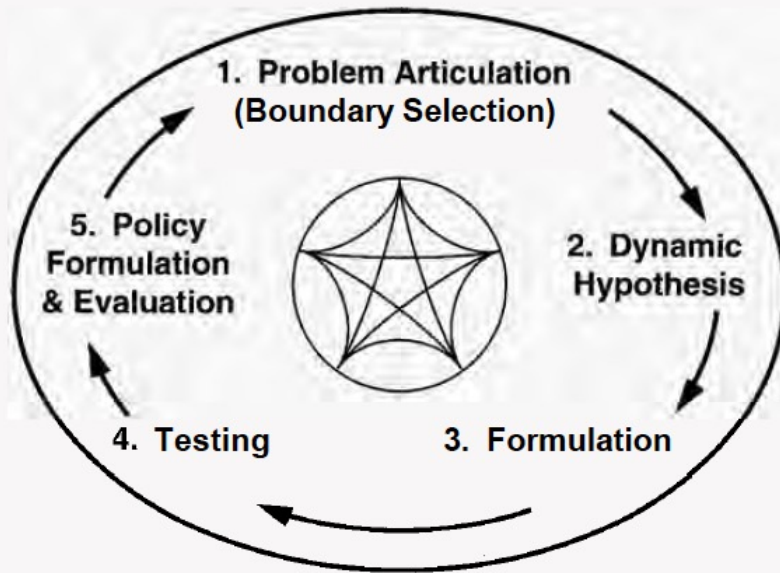
Pruebas

- **Comparación con los modos de referencia:** ¿El modelo reproduce el comportamiento del problema de manera adecuada para su propósito?
- **Robustez en condiciones extremas:** ¿el modelo se comporta de manera realista cuando está estresado por condiciones extremas?
- **Sensibilidad:** ¿Cómo se comporta el modelo dada la incertidumbre en los parámetros, las condiciones iniciales, el límite del modelo?

Evaluación y diseño de políticas

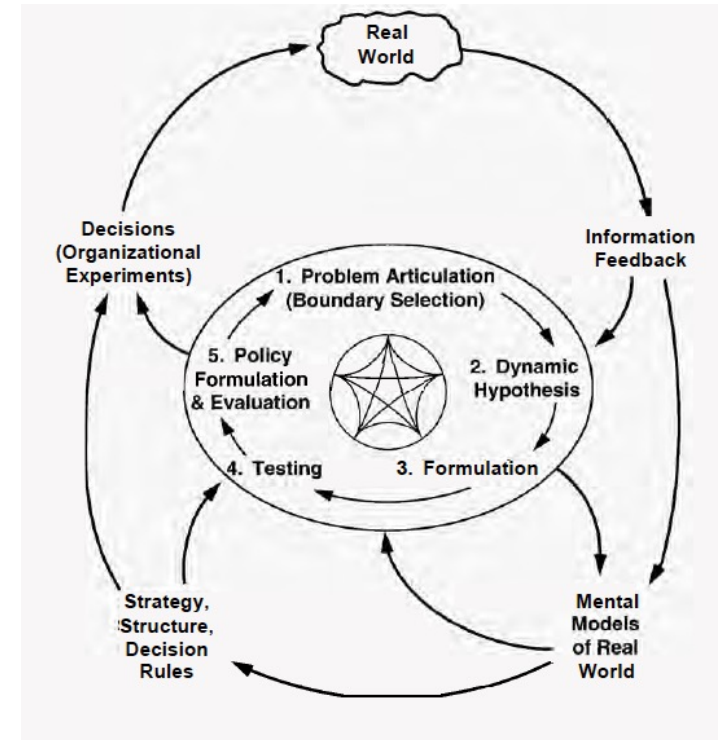
El modelado es iterativo

El proceso de modelado es iterativo.



Los resultados de cualquier paso pueden generar información que lleve a revisiones en cualquier paso anterior (indicado por los enlaces en el centro del diagrama).

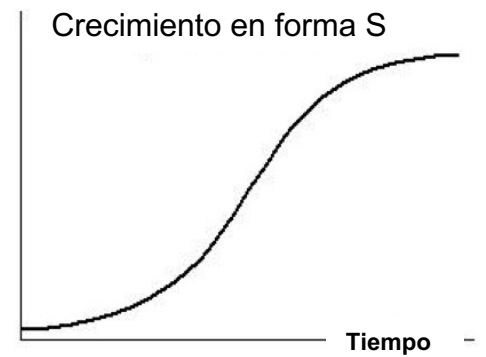
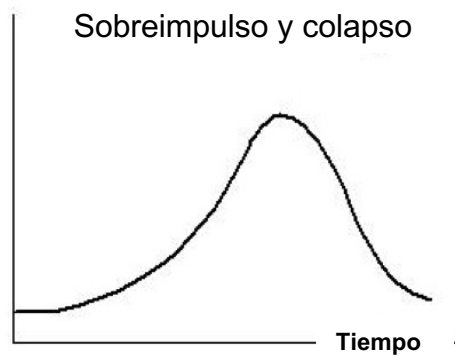
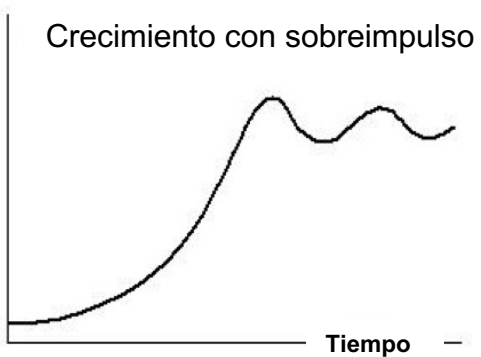
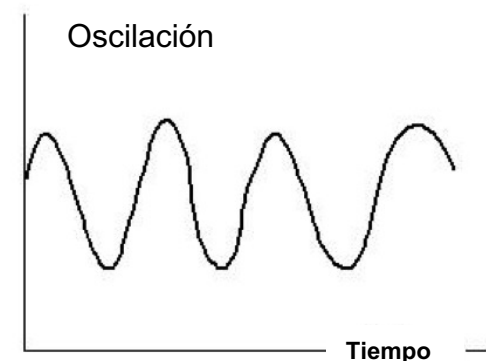
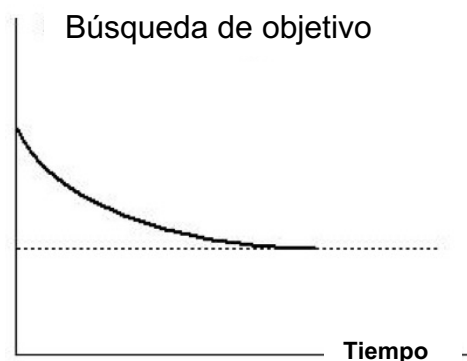
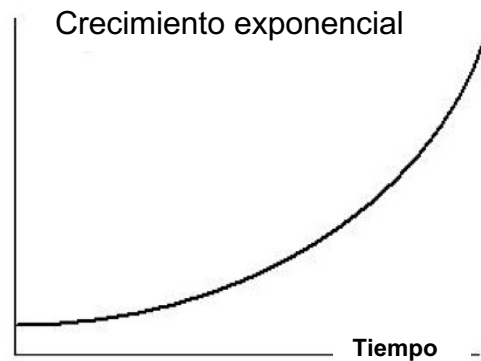
El modelado está integrado en la dinámica del sistema.



El modelado efectivo implica una iteración constante entre experimentos y aprendizaje en el mundo virtual y experimentos y aprendizaje en el mundo real.

Estructura y comportamiento de sistemas dinámicos

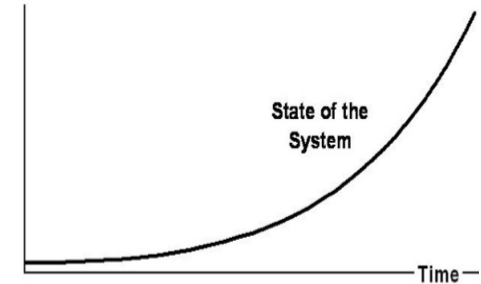
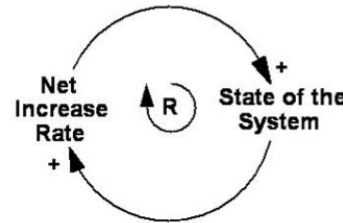
- El comportamiento de un sistema surge de su estructura
- Los modos básicos de comportamiento en los sistemas dinámicos se identifican junto con las estructuras de retroalimentación que los generan.



Estructura y comportamiento de sistemas dinámicos

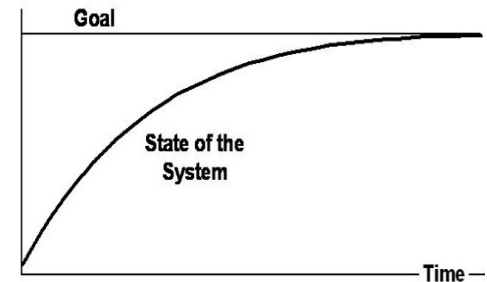
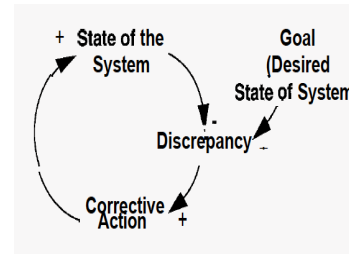
Crecimiento exponencial

- Surge de la retroalimentación positiva (autorrefuerzo)
- Cuanto mayor sea la cantidad, mayor será su aumento neto.
- Ejemplo: interés compuesto, crecimiento poblacional



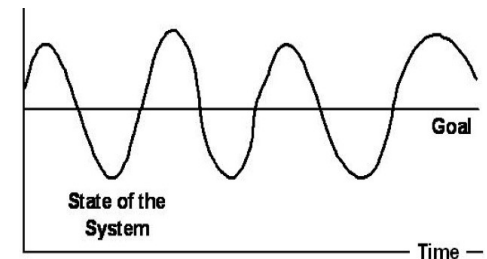
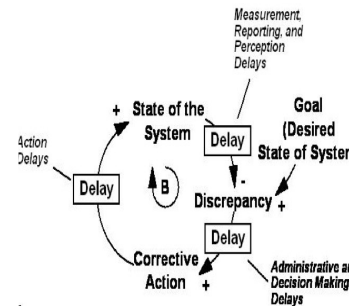
Búsqueda de objetivo

- Los bucles negativos buscan equilibrio, y tratan de llevar el sistema al estado deseado (meta).
- Los bucles negativos contrarrestan los cambios o las alteraciones.



Oscilación

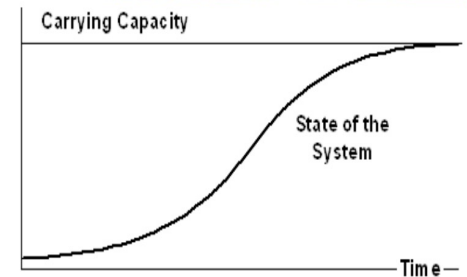
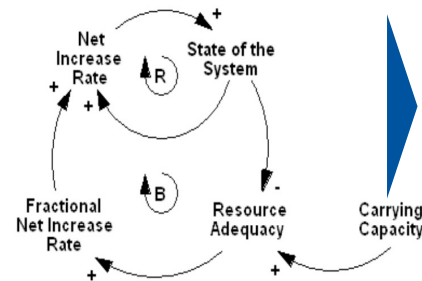
- Son causadas por ciclos de retroalimentación negativa.
- El estado del sistema se compara con su objetivo y se eliminan discrepancia.
- El estado del sistema sobrepasa su estado de equilibrio, se invierte, luego se sobrepasa, y así sucesivamente.



Estructura y comportamiento de sistemas dinámicos

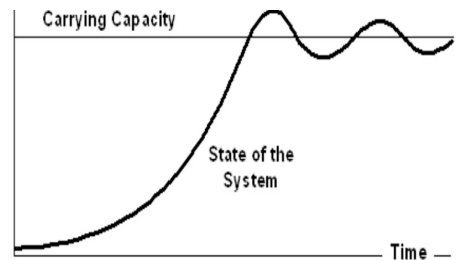
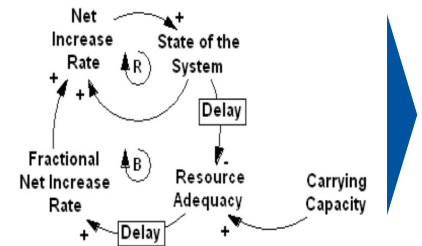
Crecimiento en forma S

- El crecimiento es exponencial al principio, pero luego se ralentiza gradualmente hasta que el estado del sistema alcanza un nivel de equilibrio.
- La forma de la curva se asemeja a una "S" estirada.



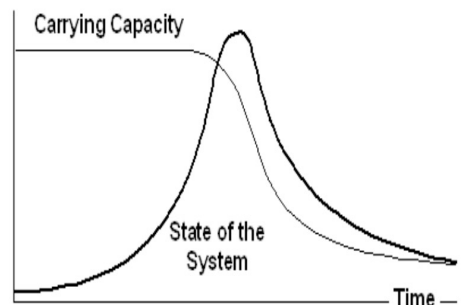
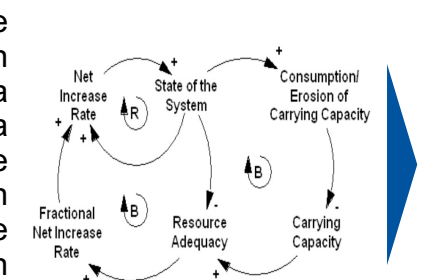
Crecimiento en forma S y sobreimpulso

- Se da cuando hay retrasos de tiempo en estos bucles negativos.
- Los retrasos conducen a la posibilidad de que el estado del sistema se sobrepase y oscile alrededor de la capacidad de carga.



Sobreimpulso y colapso

- La capacidad del medio ambiente para sustentar a una población en crecimiento se ve consumida por la propia población. Por ejemplo, la población de ciervos en un bosque puede crecer tanto que sobreexplotan la vegetación, lo que lleva a morirse de hambre y a una disminución abrupta de la población.



Ejemplo 1: Cultivos de naranjas

Observaciones iniciales:

- El precio de las naranjas, como la mayoría de los productos agrícolas, fluctuará de vez en cuando.
- Cuando el precio de las naranjas es alto, los agricultores tienden a aumentar la superficie dedicada a los naranjos para maximizar las ganancias.
- Cuando hay un exceso de naranjas para vender, el precio baja.
- Cuando baja el precio de las naranjas, los agricultores tienden a reducir la superficie dedicada a los naranjos para reducir los costos.

1. Articular el problema



- Existe constante flujo en el precio de las naranjas
- ¿Cómo afectan las políticas de cultivo del agricultor (cuánto plantar) los precios y las ganancias y viceversa?

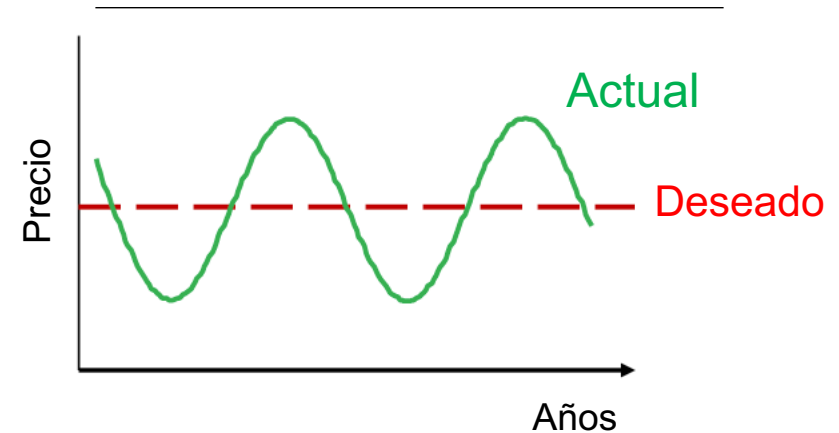
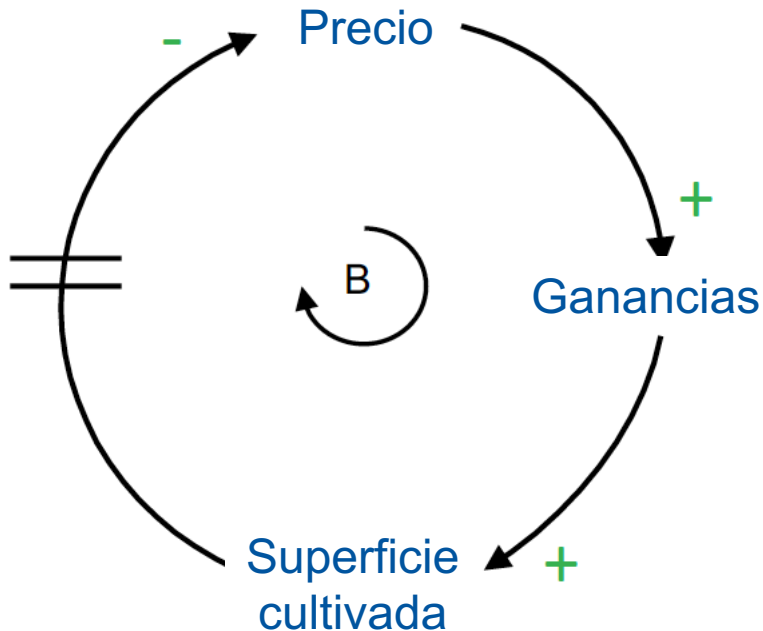
Ejemplo 1: Cultivos de naranjas

2. Formular hipótesis



Aspectos a considerar

- Causalidad y retroalimentación
- Desfases y retrasos
- Comportamientos



Diagramas causales

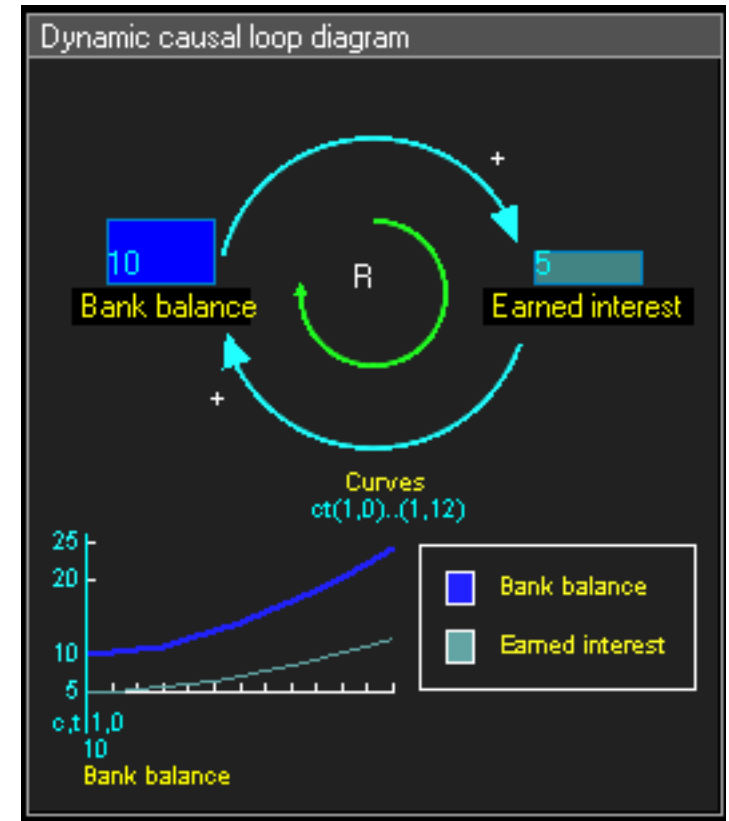
Los diagramas causales son una herramienta importante para representar la estructura de retroalimentación de los sistemas.

Objetivo

Capturar y comunicar fuentes e implicaciones de interacciones y retroalimentación dentro de un sistema.

Elementos básicos

- Vínculos o enlaces causales (polaridad positiva o negativa)
- Bucles (de reforzamiento o balance)
- Retrasos o retrasos en el tiempo

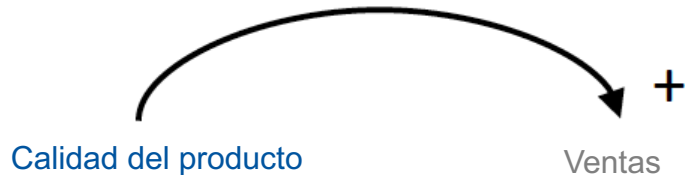


Vínculos o enlaces causales

Los vínculos causales capturan la relación entre dos variables y deben tener polaridad Positiva (+) o Negativa (-).

Polaridad positiva (+): las variables se mueven o cambian en la misma dirección

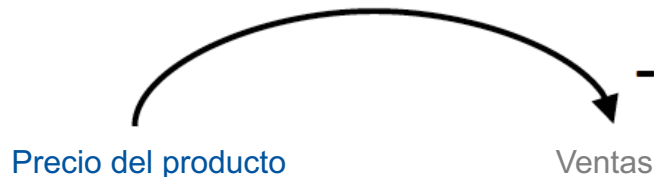
- Un aumento en una variable provoca un aumento en la otra variable.
- Una disminución en una variable provoca una disminución en la otra variable.



En igualdad de condiciones, si la **calidad del producto aumenta**, entonces las **ventas aumentarán** por encima de lo que hubieran sido, y viceversa.

Polaridad negativa (-): las variables se mueven o cambian en la dirección opuesta

- Un aumento en una variable provoca una disminución en la otra variable.
- Una disminución en una variable provoca un aumento en la otra variable.



En igualdad de condiciones, si el **precio del producto aumenta**, entonces las **ventas disminuirán** por debajo de lo que hubieran sido, y viceversa.

Vínculos o enlaces causales: Reglas para construir enlaces causales

1. Evite las polaridades ambiguas

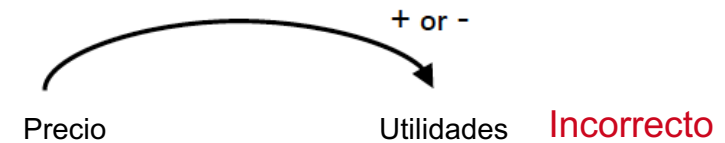
2. Utilice sustantivos, no verbos, al nombrar variables

3. Tener un sentido claro de la dirección

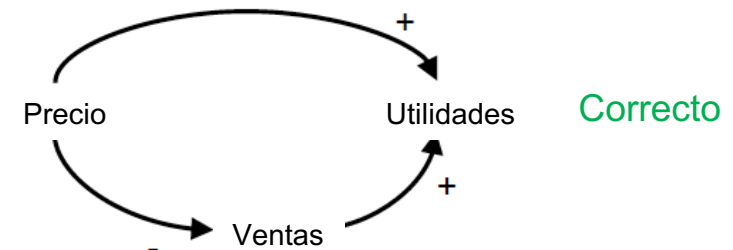
4. Las variables deben ser positivas

5. Elija el nivel correcto de agregación

6. Evite las relaciones falsas o que degeneren su origen



Si la polaridad de un vínculo causal no está clara, es probable que le falten vínculos adicionales.



Vínculos o enlaces causales: Reglas para construir enlaces causales

1. Evite las polaridades ambiguas

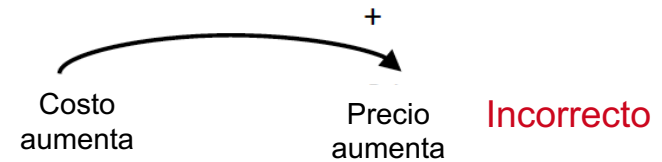
2. Utilice sustantivos, no verbos, al nombrar variables

3. Tener un sentido claro de la dirección

4. Las variables deben ser positivas

5. Elija el nivel correcto de agregación

6. Evite las relaciones falsas o que degeneren su origen

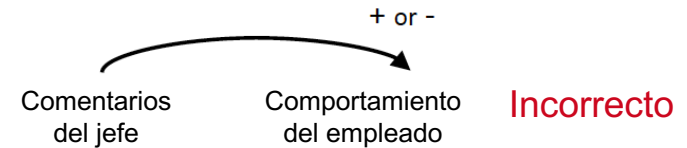


Las variables siempre deben ser sustantivos. Los enlaces representan las acciones o los verbos.

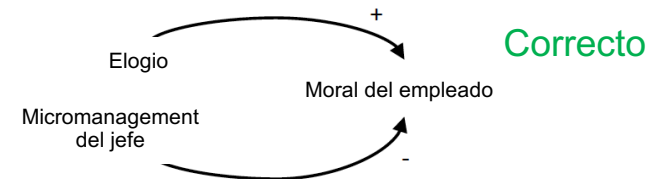


Vínculos o enlaces causales: Reglas para construir enlaces causales

1. Evite las polaridades ambiguas
2. Utilice sustantivos, no verbos, al nombrar variables
- 3. Tener un sentido claro de la dirección**
4. Las variables deben ser positivas
5. Elija el nivel correcto de agregación
6. Evite las relaciones falsas o que degeneren su origen

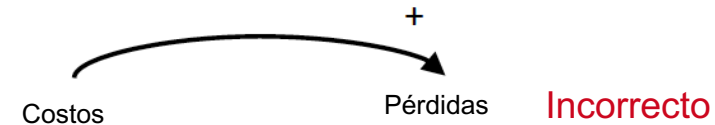


Las variables deben tener un sentido de dirección claro y fácil de entender; no pueden implicar múltiples direcciones.



Vínculos o enlaces causales: Reglas para construir enlaces causales

1. Evite las polaridades ambiguas
2. Utilice sustantivos, no verbos, al nombrar variables
3. Tener un sentido claro de la dirección
- 4. Las variables deben ser positivas**
5. Elija el nivel correcto de agregación
6. Evite las relaciones falsas o que degeneren su origen



Las variables generalmente deben ser resultados positivos. Evite usar in- o no- en el nombre. Esto evita confusión en la interpretación.

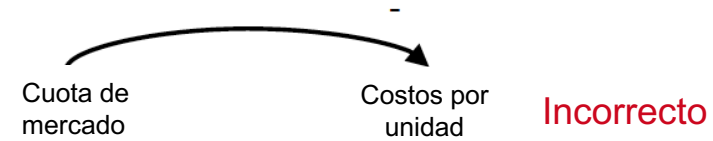


Vínculos o enlaces causales: Reglas para construir enlaces causales

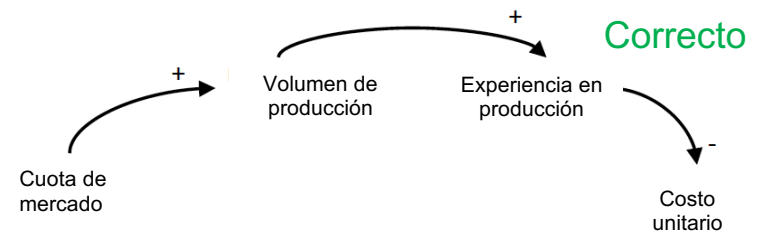
1. Evite las polaridades ambiguas
2. Utilice sustantivos, no verbos, al nombrar variables
3. Tener un sentido claro de la dirección
4. Las variables deben ser positivas

5. Elija el nivel correcto de agregación

6. Evite las relaciones falsas o que degeneren su origen

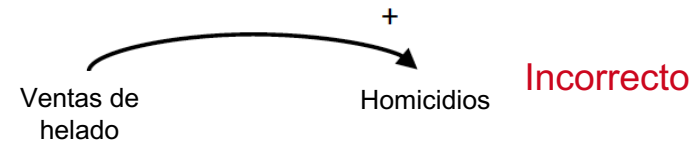


Si bien tener demasiados detalles dificulta el seguimiento de un diagrama causal, tener muy pocos también puede confundir a las personas. Haga las variables intermedias más explícitas si esto ayuda a explicar la lógica de la retroalimentación.

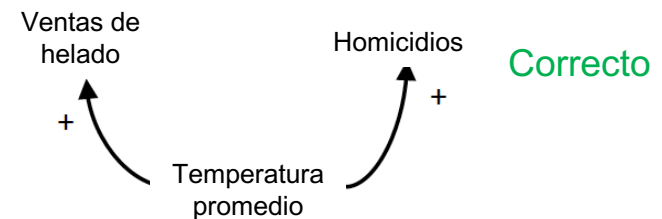


Vínculos o enlaces causales: Reglas para construir enlaces causales

1. Evite las polaridades ambiguas
2. Utilice sustantivos, no verbos, al nombrar variables
3. Tener un sentido claro de la dirección
4. Las variables deben ser positivas
5. Elija el nivel correcto de agregación
- 6. Evite las relaciones falsas o que degeneren su origen**



Todos los enlaces deben representar una relación causal dentro de su sistema. Pero la correlación no es igual a la causalidad.



Bucles

Bucles causales

- Un diagrama que consta de variables conectadas por vínculos causales que representan relaciones en un sistema complejo.

Propósito:

- Mapeo de los modelos mentales de equipos / individuos
- Mostrar y comunicar los comentarios importantes

Cuadro de comportamiento a lo largo del tiempo (BOT)

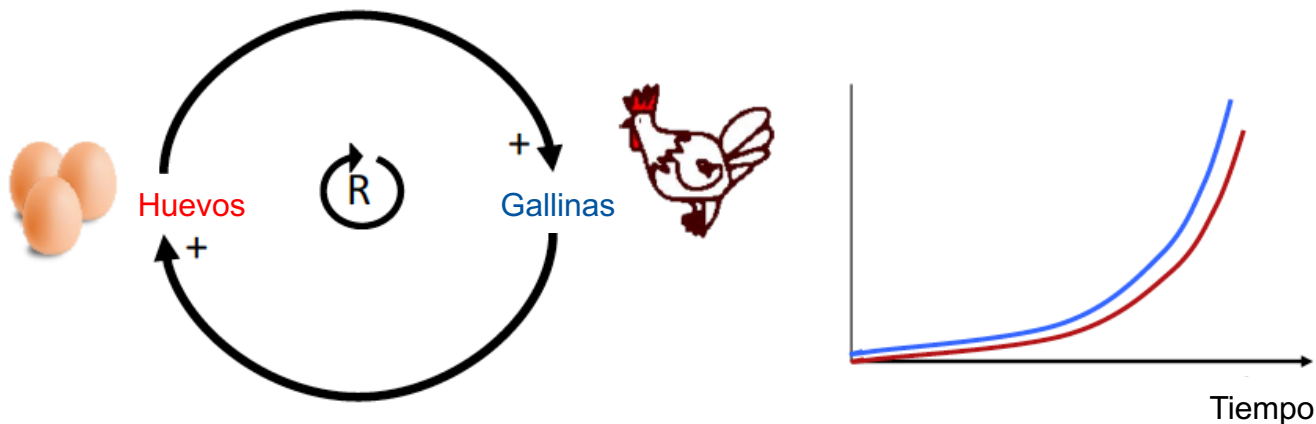
- Los gráficos BOT surgen de las relaciones descritas en el CLD
- Seguimiento de un atributo principal (resultado) de un sistema a lo largo del tiempo
- NO son pronósticos puntuales: es más una representación de la forma del resultado.

Dos tipos de CLD según la polaridad

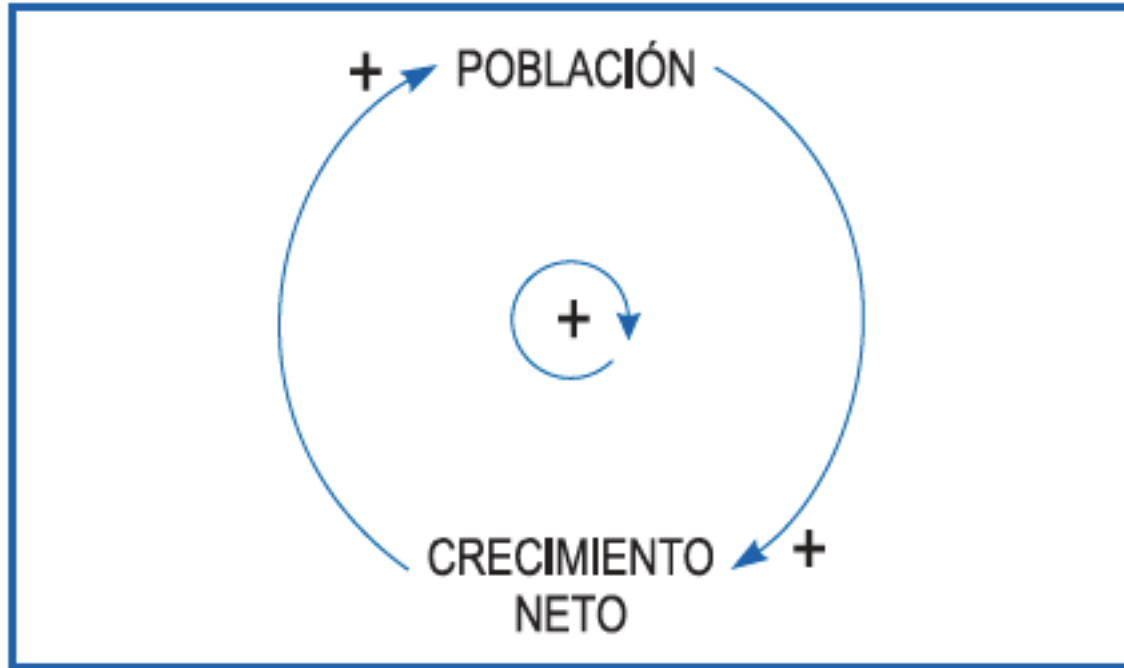
- Bucle de refuerzo: un bucle que proporciona retroalimentación positiva
- Bucle de equilibrio: un bucle que proporciona retroalimentación negativa

Bucles de reforzamiento

- Una colección de enlaces que forman un bucle que proporciona comentarios positivos.
- A veces llamados **bucles de realimentación positiva**
- Indicado por una R en un pequeño bucle
- Da como resultado un crecimiento (o disminución) exponencial a lo largo del tiempo

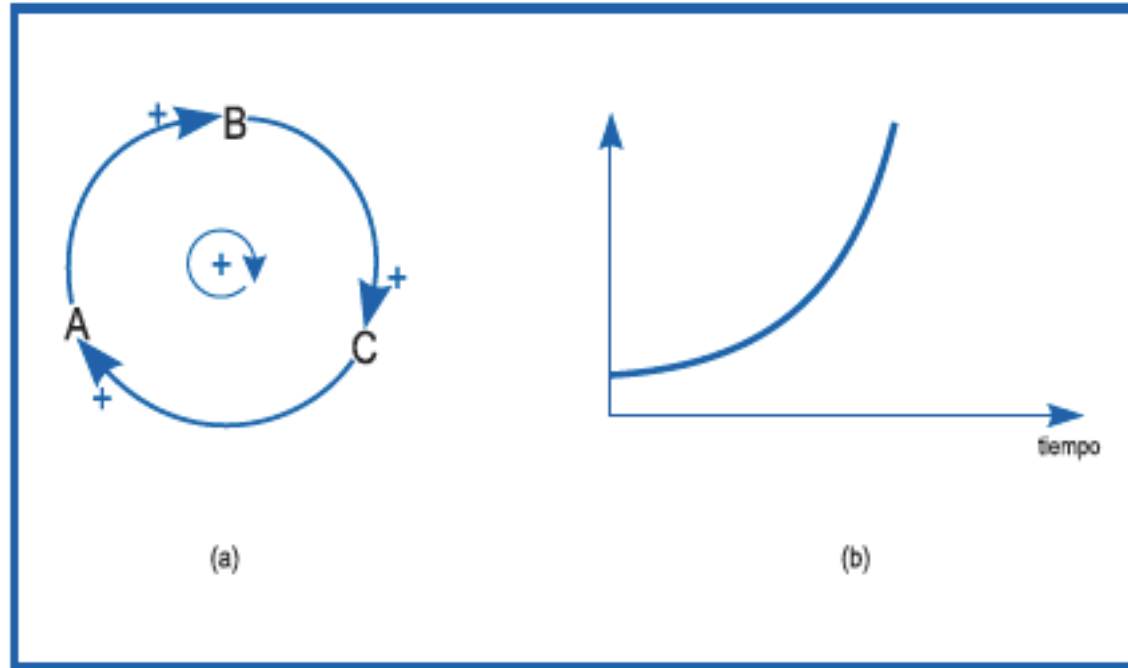


Bucles de reforzamiento



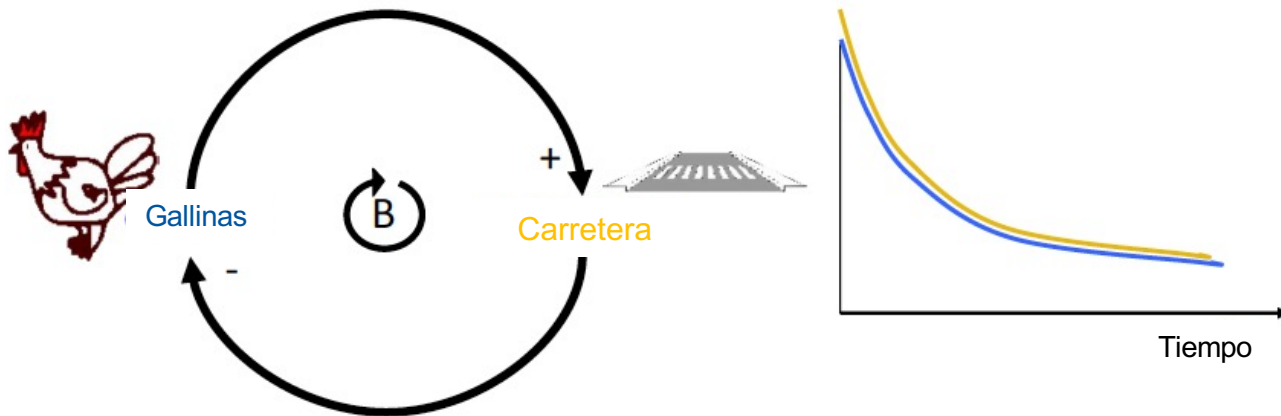
- Se trata de un bucle en el que todas las influencias son positivas
- Representa un proceso en el que un estado determina una acción, que a su vez refuerza este estado, y así indefinidamente.
- Cuanto mayor sea la población, mayor es su crecimiento, por lo que a su vez mayor es la población

Bucles de reforzamiento

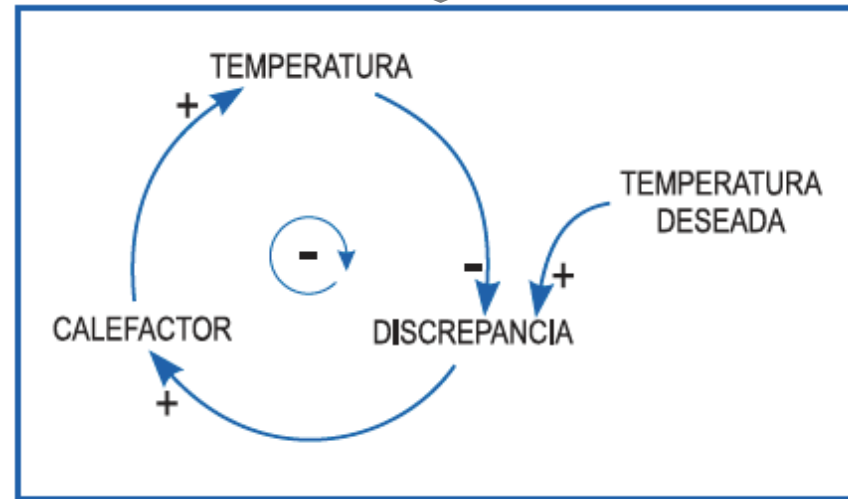
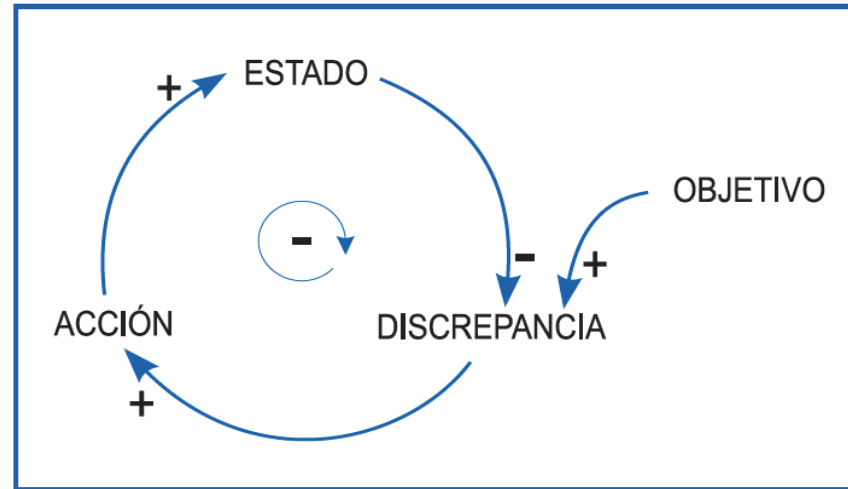


Bucles de balance

- Una colección de enlaces que forman un bucle que proporciona comentarios negativos.
- A veces llamados **bucles de realimentación negativa**
- Indicado por una B en un pequeño bucle
- Generalmente da como resultado algún tipo de equilibrio o estado de equilibrio a lo largo del tiempo.
- Se pueden utilizar metas u objetivos para modelar mejor el sistema

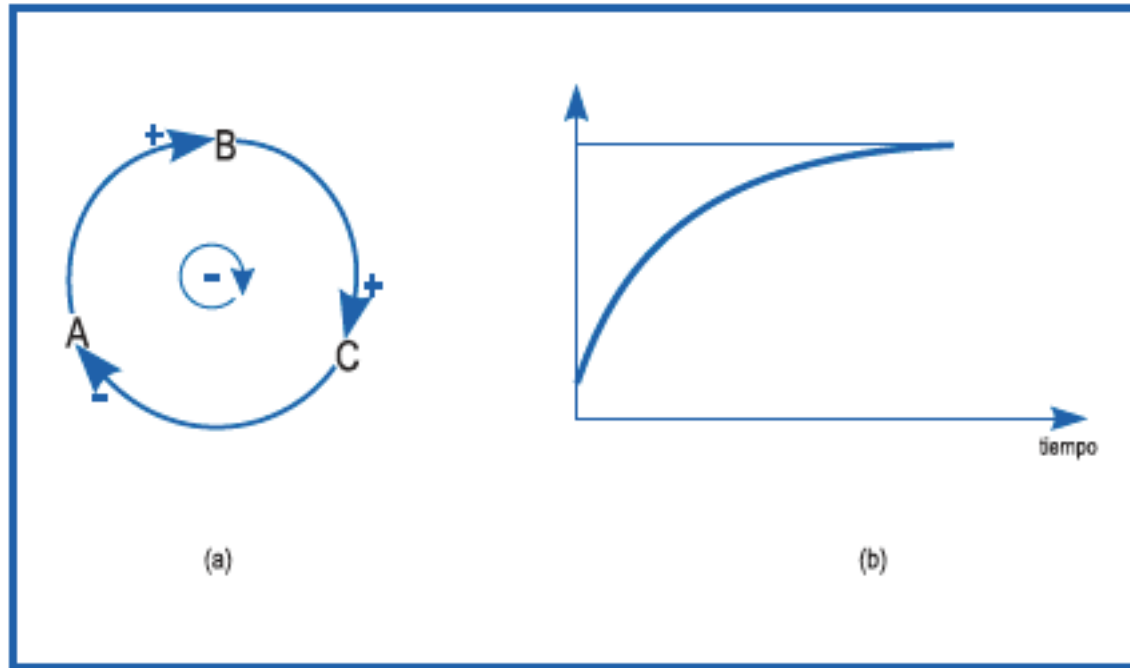


Bucles de balance



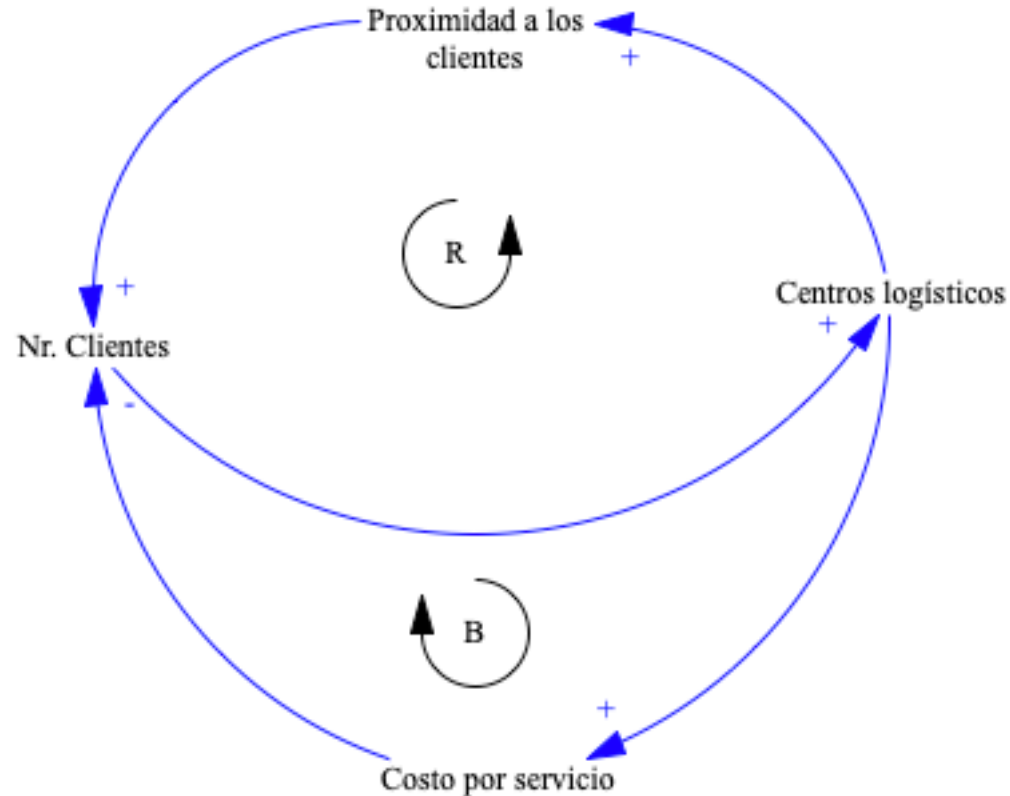
Bucles de balance

Un bucle de realimentación negativa tiene la notable propiedad de que si, por una acción exterior, se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación.



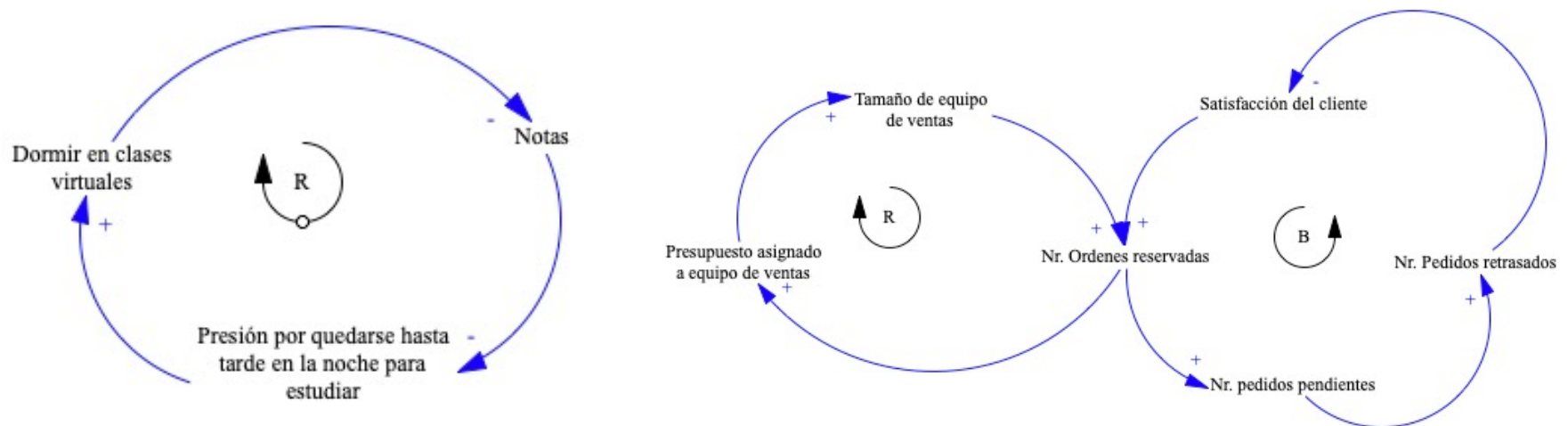
Ejemplo 2: Cadena de suministro

- Se desea esquematizar la relación entre el número de centros logísticos y número de clientes



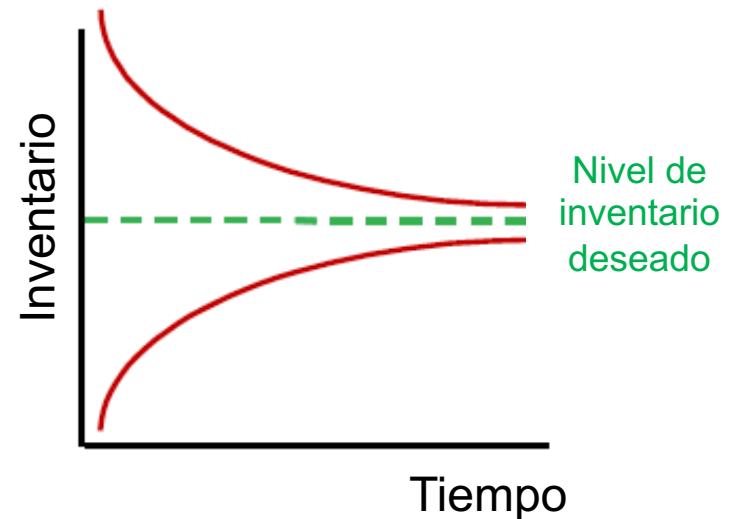
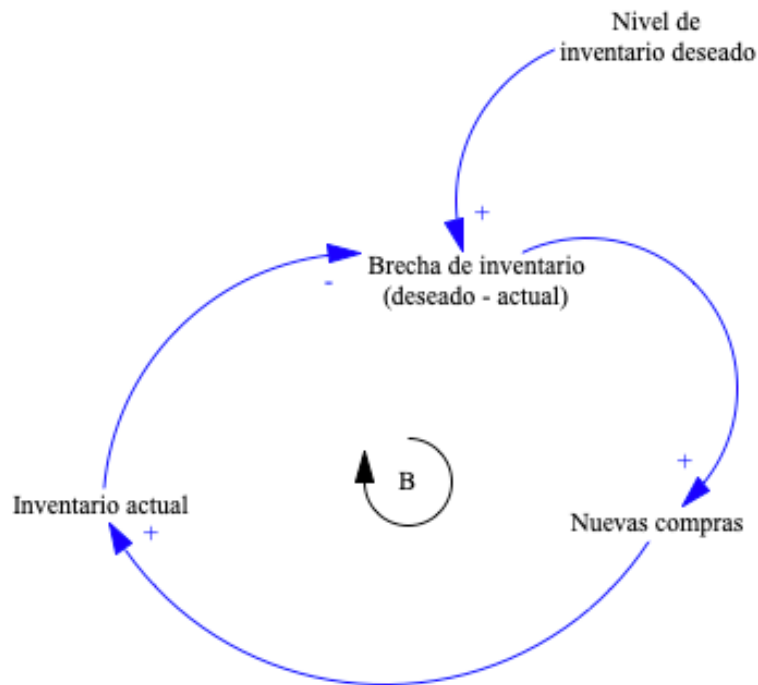
Cómo se determina la polaridad del bucle

1. Cuente el número de enlaces negativos; si es impar, entonces es un bucle de equilibrio
 - Similar a multiplicar los signos, por ejemplo;
 - $(+) * (-) * (-) = +$ Reforzamiento
 - $(-) * (+) * (+) = -$ Balance
2. Trace el efecto alrededor del bucle.
 - Haga un cambio en una variable y vea cómo regresa.
 - Si regresa en la misma dirección, entonces es un Bucle de Reforzamiento
 - Si regresa en la dirección opuesta, entonces es un Bucle de Balance



Bucle de balance: Comportamiento de búsqueda de objetivo

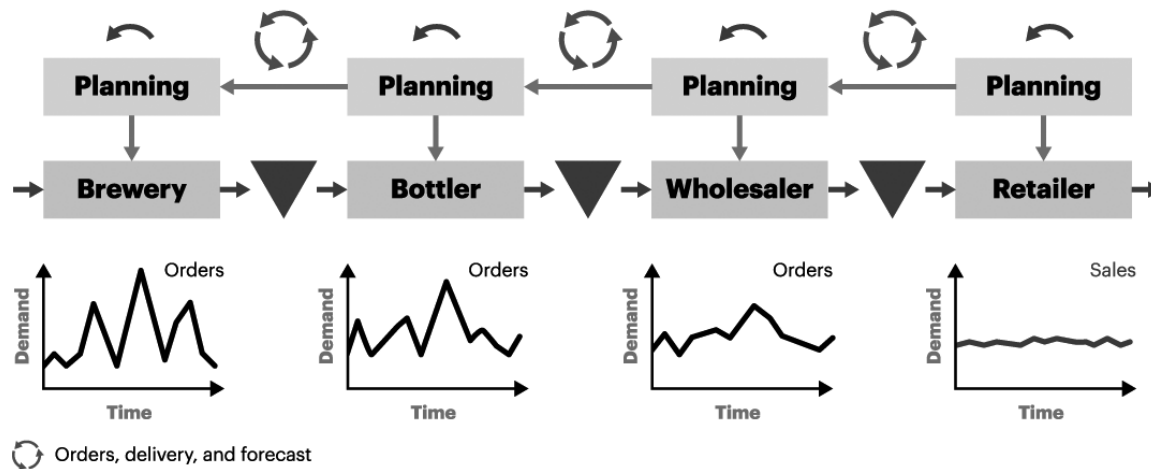
- Todos los bucles de equilibrio tienen una meta o un objetivo implícito.
- Este objetivo deseado debe hacerse explícito, ya que es parte del mecanismo de retroalimentación.
- El estado final del bucle de equilibrio, entonces es la meta o el objetivo deseado.
- La desviación del objetivo proporciona una retroalimentación al sistema.



Retrasos: El efecto Látigo

- Los retrasos se indican mediante barras dobles en un vínculo causal.
- Cuanto mayor sea la demora, más "agresiva" será la respuesta y más tiempo se alcanzará el estado estable.
- Los retrasos entre las acciones y las consecuencias están en todas partes. . .
- El efecto látigo se debe en parte a retrasos debidos a los tiempos de envío, al agrupamiento de pedidos.
- Además, cada jugador en una cadena de suministro tiene diferentes motivaciones y visibilidad limitada.

The Bullwhip Effect



Retrasos

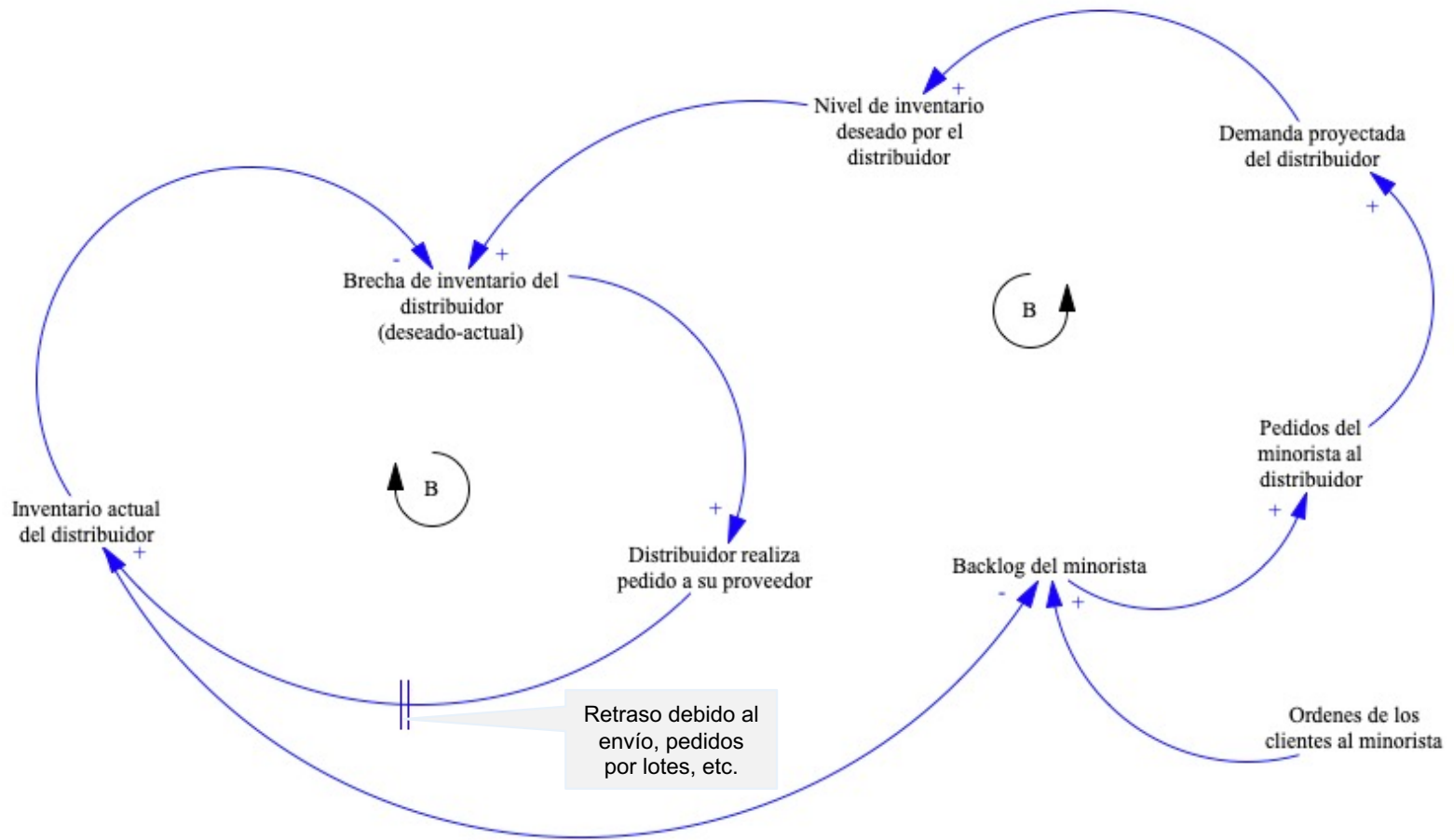


Diagrama Stock and Flow – Nivel y Flujo

Nivel

- Definen el "estado" del sistema
- Representa acumulación / nivel
- Medido en unidades
- Ejemplos: agua en una bañera, hoja de balance, inventario, etc

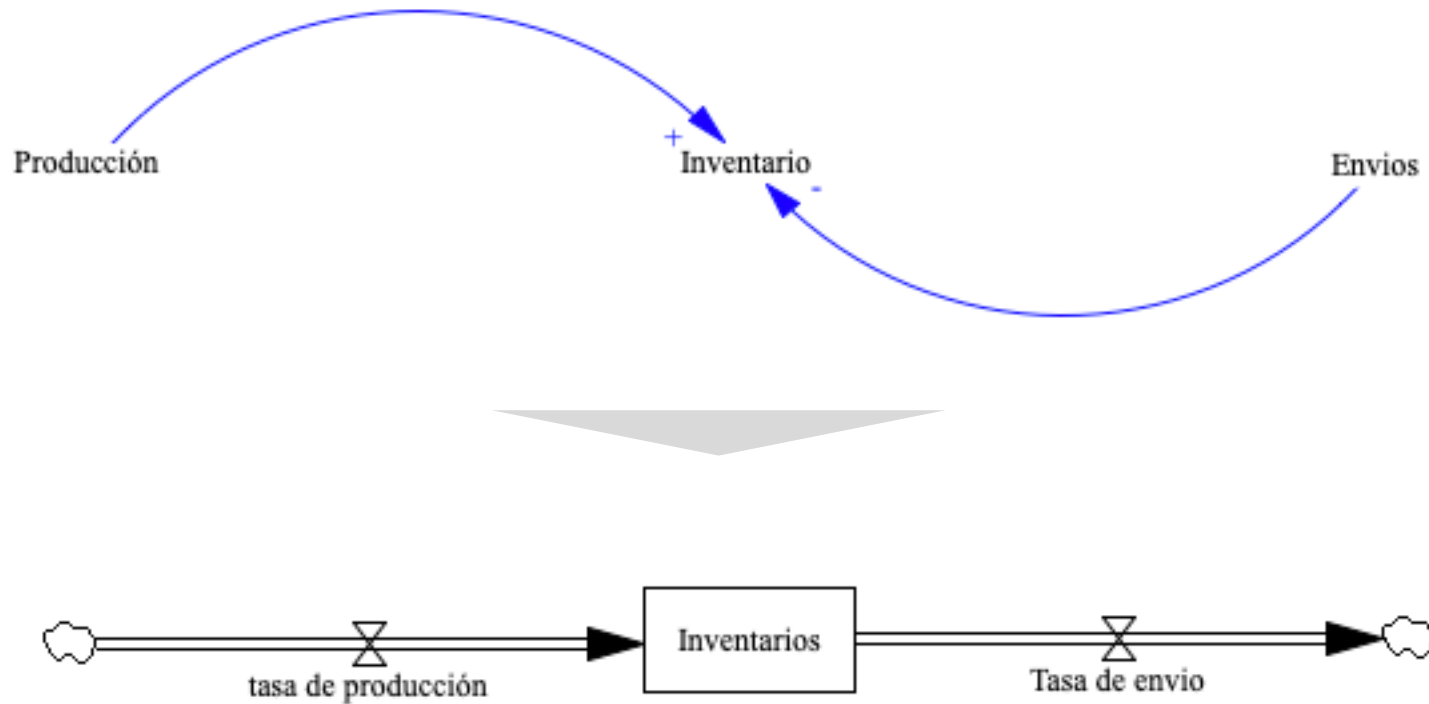
Nivel

Flujo

- Define la tasa de cambio en los estados del sistema.
- Modifica el nivel de existencias o estado del sistema
- Medido en unidades / tiempo
- Ejemplos: estado de flujo de caja, ingresos – Gastos, tasa de rendimiento (reabastecimiento - envíos)



Ejemplo 3: Diagrama de Nivel y Flujo



Bibliografía

- Stermann, J. (2000). *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill
- Cassandras & Lafortune. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer
- Alvarez, H. (2011). *Introducción a la Simulación*. Universidad Tecnológica de Panamá
- Schaffernicht, M. (2006). *Dinámica de Sistemas – Tomo 1: Fundamentos*.
- Aracil, J. (1995). *Dinámica de Sistemas*. Isdefe
- Blanchard, B. (1996). *Ingeniería de Sistemas*. Isdefe
- Rees, M. (2015). *Business Risk and Simulation Modeling in Practice*. John Wiley & Sons Ltd
- Winston, W. (2017) *Microsoft Excel 2016 – Data Analysis and Business Modeling*. Microsoft press
- Dr. Lars Meyers. *Supply Chain Dynamics*. MIT - EDX



Ricardo Caballero, M.Sc.

Docente Tiempo Completo
Facultad de Ingeniería Industrial
Centro Regional de Chiriquí
Universidad Tecnológica de Panamá

E-mail: ricardo.caballero@utp.ac.pa

<https://www.academia.utp.ac.pa/ricardo-caballero>