



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

01162
1
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ARQUETIPOS SISTÉMICOS DE LA
GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA**

Ing. Graciela Adriana Camino Zapata

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)

DIRIGIDA POR:
Dr. Polioptro F. Martínez Austria

CIUDAD UNIVERSITARIA
2003



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN DISCONTINUA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas •
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso
el contenido de mi trabajo académico

NOMBRE: Graciela Adriana

Camino Zapata

FECHA: 13 de Mayo 2013

FIRMA: 

En recuerdo a mi Padre

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II

... Os aseguro que la inteligencia tiene sus cosas buenas, y que entender con lucidez y profundidad, y ver nuevas relaciones entre las ideas, y descubrir los hechos bajo las palabras procura tal alegría que no sé compararla a ninguna otra

G. Papini

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III

Un especial agradecimiento . . .

Al Dr. Polioptro F. Martínez Austria por su asesoría y valiosas sugerencias, que hasta la conclusión del trabajo me supo proporcionar, y sobre todo por su sincera amistad.

Al M.I. Alfonso Oláiz y Pérez, a la Dra. Joselina Espinoza Ayala, al Dr. Oscar Fuentes Mariles y al Dr. Carlos Escalante por sus importantes observaciones y por el tiempo invertido en la revisión del presente trabajo de tesis.

Al M.I. Jorge Hidalgo Toledo por su amable disposición para brindarme información y valiosas discusiones de aporte al trabajo.

Al Dr. Rubén Morales, al Lic. Francisco Villavicencio, al M.I. Roberto Mejía, al Dr. René Lobato y al M.I. Ivan Hernández por su franca amistad y apoyo.

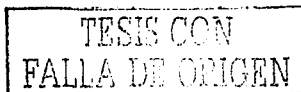
Al M.I. José Luis Bahena Manjarrez por sus acertadas sugerencias en la revisión del trabajo y en especial por su incondicional apoyo personal.

A todos los forjadores de mi preparación académica por sus apreciables enseñanzas tanto en las aulas de la maestría como fuera del salón de clase.

A todos aquellos que me brindaron su confianza, soporte y amistad durante mi estancia en la República Mexicana.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado por el apoyo económico recibido a través del Programa de Becas de Intercambio.

*Y finalmente, a la **Universidad Nacional Autónoma de México** por acogerme en sus instalaciones del Campus Morelos al interior del **Instituto Mexicano de Tecnología del Agua**.*



Índice General

		pág.
Capítulo 1	Gestión integral de los recursos hidráulicos	1
1.1	Introducción	1
1.2	Panorama del estado de los recursos hidráulicos	3
1.3	Vulnerabilidad hídrica	5
1.4	Principios básicos para la gestión del agua	8
Capítulo 2	Introducción a la quinta disciplina y los arquetipos sistémicos	11
2.1	Introducción	11
2.2	La quinta disciplina	12
2.3	Dinámica de sistemas	14
	2.3.1 Círculos de causalidad	15
	2.3.1.1 Tipos de retroalimentación	16
2.4	Arquetipos sistémicos	19
	2.4.1 Soluciones rápidas que fallan	19
	2.4.2 Desplazamiento de carga	21
	2.4.3 Erosión de metas	22
	2.4.4 Límites del crecimiento	24
	2.4.5 Escalada	25
	2.4.6 Tragedia de los comunes	26
	2.4.7 Crecimiento y subinversión	27
	2.4.8 Éxito para quien tiene éxito	28
Capítulo 3	Arquetipos sistémicos de la gestión integral del agua	31
3.1	Introducción	31
3.2	Metodología de aplicación sistémica	32
3.3	Antecedentes del estudio	32
3.4	Planteamiento del problema	34
	3.4.1 Disponibilidad del recurso hídrico	34
	3.4.2 Calidad del agua	38
	3.4.3 Distribución del recurso según usos	40
3.5	Análisis del sistema	42
3.6	Diagrama causal del lago de Chapala	50

Capítulo 4	Modelación del arquetipo sistémico	52
4.1	Modelación del sistema	52
	4.1.1 Herramientas para la modelación del sistema	53
	4.1.2 Modelación de ciclos retroalimentadores	55
4.2	Ejemplos sencillos de modelación de arquetipos	58
	4.2.1 Desplazamiento de carga	58
	4.2.2 Tragedia de los comunes	60
	4.2.3 Adversarios accidentales	61
4.3	Modelación del arquetipo de desplazamiento de carga del lago de Chapala	62
Capítulo 5	Conclusiones y recomendaciones	68
Anexo A	Arquetipos sistémicos	72
A.1	Soluciones rápidas que fallan	73
A.2	Desplazamiento de carga	73
A.3	Erosión de metas	74
A.4	Límites del crecimiento	74
A.5	Escalada	75
A.6	Tragedia de los comunes	76
A.7	Crecimiento y subinversión	76
A.8	Éxito para quien tiene éxito	77
Bibliografía		78

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Lista de Figuras

- Figura 1.1** Disponibilidad de los recursos hídricos (%) versus población (%)
Figura 1.2 Distribución según tipos de uso de agua a nivel mundial
Figura 1.3 Usos competitivos de agua por grupos de países en función a sus ingresos económicos
Figura 1.4 Distribución de la población sin acceso a agua potable (total no servida 1.1 billones) y saneamiento (total no servida 2.4 billones)
Figura 1.5 Distribución de la vulnerabilidad hídrica en varios países en el mundo bajo el primer escenario. Año 1990
Figura 1.6 Distribución de la vulnerabilidad hídrica en varios países en el mundo bajo el escenario seis. Año 2025
- Figura 2.1** Ejemplo comparativo entre el pensamiento lineal y el pensamiento sistémico
Figura 2.2 Ejemplos de ciclos retroalimentadores positivo y negativo aplicados a la problemática del agua
Figura 2.3 Ejemplo de ciclo reforzador
Figura 2.4 Evolución en el tiempo de las ventas en empresas lucrativas
Figura 2.5 A la izquierda, ejemplo de ciclo estabilizador en seres vivos. A la derecha, evolución en el tiempo de la asimilación de agua
Figura 2.6 A la izquierda, ejemplo de ciclo estabilizador con demora. A la derecha, evolución en el tiempo de la satisfacción de usuarios
Figura 2.7 Ejemplos de la estructura "soluciones rápidas que fallan" en la problemática de los cinturones de pobreza en ciudades
Figura 2.8 Comportamiento de la variable de estado "población sin servicios" en la estructura "soluciones rápidas que fallan"
Figura 2.9 Ejemplo de una estructura de "desplazamiento de carga" en la agricultura
Figura 2.10 Evolución en el tiempo de la variable de estado sintomática "bajos beneficios agrícolas" y de la capacidad de solución del problema
Figura 2.11 Ejemplo de una estructura de "erosión de metas" aplicada a la problemática de poblaciones sin acceso a servicios básicos
Figura 2.12 Desempeño del sistema a través del tiempo, con respecto a la meta inicial
Figura 2.13 Ejemplo de una estructura tipo "límite de crecimiento" en la construcción de las PTARs
Figura 2.14 Comportamiento evolutivo de la variable "% de tratamiento de aguas" frente al crecimiento esperado
Figura 2.15 Ejemplo de dos empresas de agua purificada en competencia
Figura 2.16 Comportamiento de los resultados alternativamente crecientes y decrecientes de ambas empresas
Figura 2.17 Estructura tipo "tragedia de los comunes"
Figura 2.18 Colapso del recurso disponible en una estructura tipo "tragedia de los comunes"
Figura 2.19 Ejemplo de una estructura tipo "crecimiento y subinversión"
Figura 2.20 Desempeño del sistema con la estructura "crecimiento y subinversión"
Figura 2.21 Ejemplo de una estructura tipo "éxito para quien tiene éxito" en la competencia por el recurso hídrico
Figura 2.22 Evolución en el tiempo de dos actores de la estructura "éxito para quien tiene éxito"
- Figura 3.1** Ubicación geográfica del lago de Chapala
Figura 3.2 Densidad de población en la región Lerma, 2000
Figura 3.3 Disponibilidad de agua en la cuenca Lerma-Chapala
Figura 3.4 Inventario de almacenamientos en la cuenca Lerma-Chapala
Figura 3.5 Calidad del agua en la región Lerma-Santiago según el parámetro ICA
Figura 3.6 Rangos de calificación del ICA según uso del agua
Figura 3.7 Demanda de agua superficial para uso agrícola, doméstico, pecuario e industrial en la región Lerma, 2000
Figura 3.8 Ciclos reforzadores de los actores del sistema
Figura 3.9 Tendencia de la disponibilidad y los beneficios típicos en una estructura "tragedia de los comunes"

Figura 3.10	Comportamiento simplificado en el tiempo de los niveles del lago
Figura 3.11	Registro de niveles de la superficie libre en el lago de Chapala 1934-2001
Figura 3.12	Evolución factible de extracciones subterráneas
Figura 3.13	Arquetipo sistémico de competencia por el recurso hídrico
Figura 3.14	Acuíferos de la cuenca Lerma-Chapala y su grado de explotación
Figura 3.15	Arquetipo sistémico de desplazamiento de carga en el lago de Chapala
Figura 3.16	Arquetipo sistémico característico de lagos someros para el lago de Chapala
Figura 3.17	Comparación entre las descargas municipales y el caudal tratado correspondiente en la cuenca Lerma-Chapala
Figura 3.18	Diagrama causal de comportamiento del lago de Chapala
Figura 4.1	Componentes de modelos cualitativos
Figura 4.2	Diagrama causal y diagrama <i>stock-flow</i> del crecimiento poblacional
Figura 4.3	Diagrama <i>stock-flow</i> del crecimiento bacteriano de <i>E.Coli</i>
Figura 4.4	Evolución del crecimiento bacteriano de <i>E.Coli</i>
Figura 4.5	Diagrama <i>stock-flow</i> de decaimiento radioactivo
Figura 4.6	Comportamiento en el tiempo del decaimiento radioactivo
Figura 4.7	Modelo ejemplificado del arquetipo desplazamiento de carga
Figura 4.8	Captura del modelo en la plataforma <i>Stella</i> del ejemplo de fuga de agua
Figura 4.9	Deslizador utilizado por el tomador de decisiones
Figura 4.10	Comportamiento del nivel de la piscina ante la opción de añadir agua
Figura 4.11	Modelo prototípico de la estructura tragedia de los comunes
Figura 4.12	Modelo prototípico de la estructura adversarios accidentales
Figura 4.13	Arquetipo de desplazamiento de carga genérico y su aplicación al lago de Chapala
Figura 4.14	Tendencia en el tiempo de la estructura de desplazamiento de carga
Figura 4.15	Modelo de balance de aguas en el lago de Chapala
Figura 4.16	Valores registrados y demandados de aguas en el lago de Chapala
Figura 4.17	Registros históricos de volúmenes de ingreso directo al lago
Figura 4.18	Registros históricos de volúmenes de evaporación del lago
Figura 4.19	Calibración del modelo de balance hídrico del lago de Chapala
Figura 4.20	Evolución histórica de los niveles del lago comparada con los niveles simulados considerando la política de distribución con volúmenes máximos autorizados por el Acuerdo de 1991
Figura 4.21	Lluvias históricas normalizadas respecto al promedio. Período 1930-2002

Lista de Tablas

Tabla 1.1	Niveles de extracción y consumo mundial de agua según tipo de uso
Tabla 1.2	Descripción de los escenarios de estudio
Tabla 1.3	Distribución del número de países según estado de vulnerabilidad hídrica bajo escenarios alternativos de estudio
Tabla 3.1	Población urbana y rural, 1990-2000 en la cuenca Lerma-Chapala
Tabla 3.2	Densidad poblacional en la región Lerma, 2000
Tabla 3.3	Cuadro comparativo de disponibilidad de agua en la cuenca Lerma-Chapala
Tabla 3.4	Balance de agua en el año 1990 en la cuenca Lerma-Chapala
Tabla 3.5	Cantidad de estaciones en la cuenca Lerma-Chapala
Tabla 3.6	Distribución de la demanda consuntiva
Tabla 3.7	Balance de agua comparativo 1990-2000 en la cuenca Lerma-Chapala
Tabla 3.8	Usos de agua en la cuenca Lerma-Chapala
Tabla 3.9	Descargas de agua en la cuenca Lerma-Chapala
Tabla 4.1	Resultados de la simulación con aplicación de los volúmenes máximos asignados por el acuerdo de 1991

Resumen

Con el fin de garantizar la calidad de la vida en nuestro planeta y el desarrollo socioeconómico sostenible de nuestras sociedades es hoy imprescindible una gestión racional y equilibrada de los recursos hídricos. La visión mundial del agua para el año 2025, a un tiempo sencilla y ambiciosa, es la siguiente: *Todo ser humano debe tener acceso seguro al agua para satisfacer sus necesidades de consumo, saneamiento y producción de alimentos y energía, a un costo razonable. El abastecimiento de agua para la satisfacción de estas necesidades básicas debe realizarse en armonía con la naturaleza* (WWC, 2000).

Se ha verificado que el problema sólo se resolverá en un marco global. Ante una problemática de gran complejidad, en la que intervienen factores de diferente naturaleza: ambientales, sociales, legales, institucionales, económicos e hidráulicos, se hace evidente la necesidad de un marco integrador. Según el pensamiento sistémico, uno de los mayores errores en el análisis de sistemas es la "fijación en los datos". Se deben buscar patrones de comportamiento detrás de los datos.

En este sentido, el presente trabajo aplicó una técnica moderna de gestión, basada en el enfoque de sistemas y la dinámica de sistemas. La aplicación de los *Arquetipos Sistémicos*, brindó una visión holística de la problemática, a través de la determinación de patrones de comportamiento típicos en cuencas hidrográficas, con lo que fue posible establecer situaciones recurrentes extrapolables para cuencas con características similares. Estos patrones, verdaderos *arquetipos sistémicos de la gestión integrada del agua* permiten evitar errores reiterativos en la administración de los recursos hidráulicos.

El estudio sistémico partió del análisis de una cuenca como unidad modular de los procesos hidráulicos (en este caso se estudió la cuenca Lerma-Chapala), luego se reconocieron las variables actuantes principales, se encontraron las interrelaciones entre las mismas y posteriormente se generó el diagrama causal del comportamiento de la cuenca. Finalmente, se modeló un arquetipo sistémico en particular para verificar las hipótesis consideradas y contrastarlas con valores de registro.

Mayo, 2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 1

Gestión integral de los recursos hidráulicos

1.1 Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más importantes en nuestro planeta. Este líquido es fundamental porque ahí se originó la vida y es el componente principal de la materia viva, constituye del 50 al 90% de la masa de los organismos vivos. Además, todos los procesos vitales de los seres vivos están asociados al agua.

La mayor parte de la superficie de la Tierra (71%) está cubierta por enormes extensiones de agua, pero sólo una pequeña fracción del volumen total es aprovechable para las actividades humanas. Esto se debe a que el 97.2% del agua del planeta es salada; únicamente el 2.8% restante es dulce, aunque la mayor parte de ésta (2.15%) se encuentra en forma de hielo en los casquetes polares y en la cima de las montañas más elevadas. Se considera, entonces, que el volumen disponible para las actividades humanas es el que se encuentra en ríos, lagos, arroyos, manantiales y depósitos subterráneos y que representa tan sólo el 0.63% del total.

Además, hay que considerar que el líquido está distribuido de manera heterogénea. Existen regiones en las que abunda y otras en las que escasea.

TESTS CON
FALLA DE ORIGEN

La distribución del agua en el mundo es tan desigual que cuatro países (Canadá, Estados Unidos, Rusia y Brasil) poseen el 42% de toda el agua potable renovable que hay en el planeta. Sin embargo, en estos países sólo habita una quinta parte de la población mundial total. Si se toma en cuenta la disponibilidad actual de los recursos hídricos continentales con respecto a la población mundial, se observa que Asia tiene el 60% de la población y sólo el 36% del recurso hídrico, Europa posee el 13% de la población y el 8% del recurso hídrico, en África vive el 13% de la humanidad y tan sólo goza del 11% del agua; en cambio en América del Norte y Central reside el 8% de la población y ésta disfruta del 15% del recurso hídrico; y finalmente, América del Sur tiene únicamente el 6% de la población del mundo, pero disfruta del 26% de los recursos hídricos (Fernández-Jáuregui, 1997).

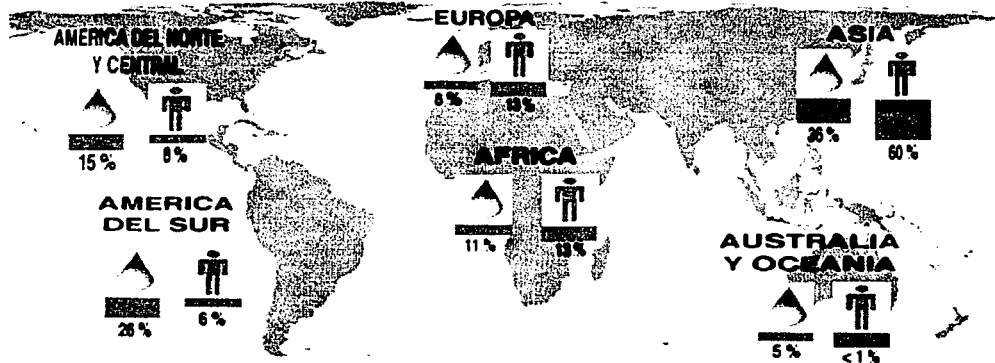


Figura 1.1 Disponibilidad de los recursos hídricos (%) versus población (%). Fuente: UNESCO, PHI. <http://www.unesco.org/uy/phi/recursos/recursos.html>

En el planeta, por lo tanto, en términos reales la disponibilidad de agua local y regional es reducida, y prácticamente cualquier actividad que intente realizar el hombre requiere de ésta.

Por otro lado, la tecnología ha permitido al hombre, hacer un mayor uso de los recursos naturales. Es por ello que se desvían ríos, se explotan las fuentes subterráneas hasta agotarlas, e incluso se secan los cuerpos de agua para dar un uso diferente a la tierra. También se deforestan los bosques y selvas, áreas de gran importancia para la recarga de los depósitos subterráneos de agua y se contamina el líquido con los desechos de las industrias, de la agricultura y de origen doméstico.

Finalmente, el panorama se agrava con la creciente demanda de agua. El acelerado crecimiento poblacional y principalmente el incremento en los niveles de vida de los seres humanos, han fomentado el aumento en el consumo per cápita. Así, Martínez-Austria (2001) hizo notar que en el siglo veinte mientras la población del mundo creció 3.6 veces, la extracción de agua creció diez veces.

1.2 Panorama del estado de los recursos hidráulicos

Haciendo un análisis de la oferta y la demanda de los recursos hidráulicos, es decir de su disponibilidad y consumo, se tiene que el agua disponible por escorrentía superficial renovable y recarga subterránea, que es la fuente principal de las extracciones humanas y el punto focal tradicional del manejo de recursos hídricos, alcanza los 40,000 km³ anuales (WWC, 2000). Una estimación adecuada de consumo de agua doméstica según diversas organizaciones internacionales, es de 50 litros por persona al día, aunque el consumo de agua per cápita varía mucho de región a región.

La demanda promedio de agua en los años 80 fue del orden de 2,800 km³ anuales. Hacia 1995, alrededor del 10% del agua disponible, es decir unos 3,800 km³ se extrajeron para usos humanos. En la actualidad, según el WWC (2000), la extracción es de 3,900 km³. Aunque de acuerdo con otros autores sería mayor. Biswas (1992) señala que el consumo total en el año 2000 estaría alrededor de 5,200 km³. De esta agua extraída, se consumen más de 2,000 km³ y el resto se devuelve a los cauces y cuerpos de agua, de ordinario con una calidad muy disminuida.

En términos generales, las extracciones de agua según el tipo de uso, se reparten de la siguiente manera: el 64% corresponde a la agricultura, el 19% al uso industrial, el 12% al uso municipal y por último el 5% corresponde a la evaporación del agua en reservorios (WWC, 2000). Debido a la baja eficiencia en el uso del agua en la agricultura y en las ciudades, una parte importante del agua extraída vuelve a los sistemas naturales. Como consecuencia, cuando se trata de consumo, éstos porcentajes varían (ver tabla 1.1).

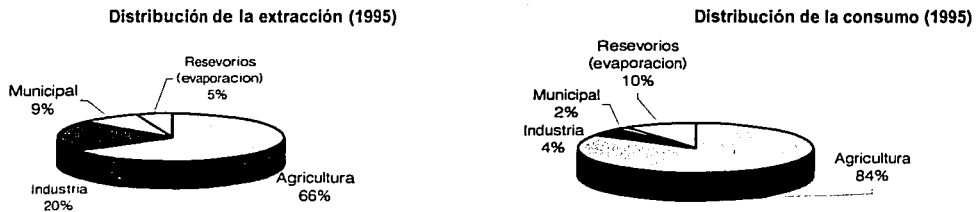


Figura 1.2 Distribución según tipos de uso de agua a nivel mundial. Fuente: WWC, 2000

Tipo de uso	EXTRACCIÓN		CONSUMO		EXTRACCIÓN		CONSUMO	
	km ³	%	km ³	%	km ³	%	km ³	%
	1995				2025			
Agricultura	2,500	66%	1,750	84%	2,650	64%	1,900	83%
Industrial	750	20%	75	4%	800	19%	100	4%
Municipal	350	9%	50	2%	500	12%	100	4%
Reservorios (evaporación)	200	5%	200	10%	220	5%	220	9%
Total	3,800	100%	2,075	100%	4,170	100%	2,320	100%

Tabla 1.1 Niveles de extracción y consumo mundial de agua según tipo de uso. Fuente: WW C, 2000

Estas cifras fueron recientemente actualizadas en el Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (*WWDR*) presentado en marzo del 2003 en Kyoto por el *World Water Assessment Programme*. El informe hace hincapié en que el uso de agua para la industria está directamente relacionada con los ingresos económicos de cada país. El consumo industrial en países con ingresos bajos y medios asciende al 10%, mientras que los países con altos ingresos económicos consumen hasta el 59% en la industria. En el informe se pronostica que en el 2025 la proporción a nivel mundial alcanzará un 24%. Se calcula que para ese entonces se gastarán 1,170 km³ de agua anuales para usos industriales.

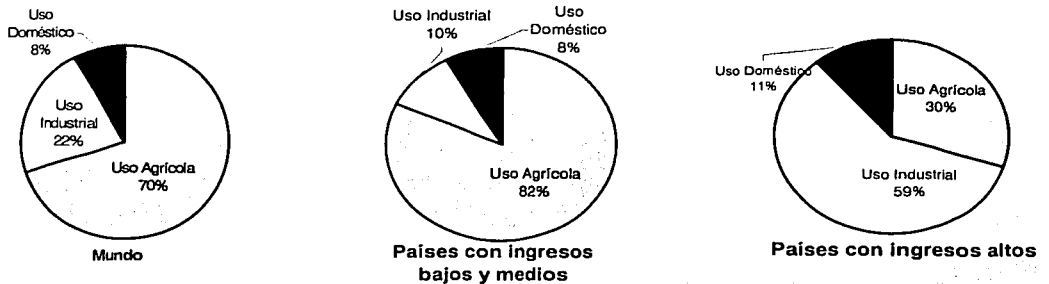


Figura 1.3 Usos competitivos de agua por grupos de países en función a sus ingresos económicos. Fuente: Resumen Ejecutivo del WWDR. Banco Mundial, 2001. Washington D.C.

A pesar del alto consumo de agua en el mundo, persisten carencias:

- o Un 20% de la población no tiene acceso al agua potable.
- o Un 50% de la población no tiene acceso al saneamiento. Se calcula que hay más de 2.2 millones de personas que mueren cada año debido a enfermedades causadas por el agua potable contaminada y el saneamiento deficiente a nivel mundial (WWDR, 2003).
- o Un 15% de la población consume 2,000 calorías/día, por lo que se encuentra en desnutrición (WWC, 2000). Se calcula que 815 millones de habitantes del planeta padecen de desnutrición. (WWDR, 2003).

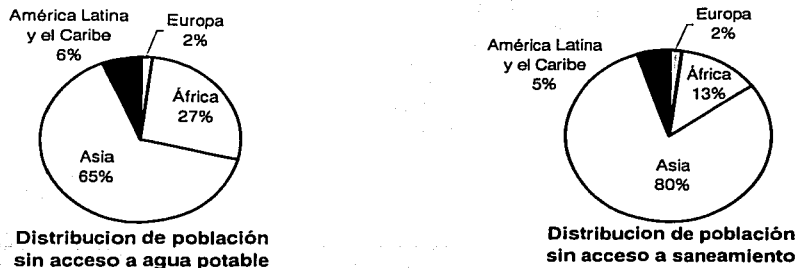


Figura 1.4 Distribución de la población sin acceso a agua potable (total no servida 1.1 billones) y saneamiento (total no servida 2.4 billones). Fuente: Resumen Ejecutivo del WWDR. WHO/UNICEF, 2002

El *Global Water Partnership* (GWP, 2000) enfatiza la noción de que el agua dulce es un recurso finito, en la medida que en promedio el ciclo hidrológico produce una cantidad fija de agua por unidad de tiempo. Esto significa, que la cantidad de agua en el planeta se mantiene constante, al mismo tiempo que la calidad se deteriora generando una disminución real en la oferta. Entretanto se registra una marcada tendencia al crecimiento de la demanda.

Para el año 2025, si las condiciones se dan con el mismo índice de comportamiento creciente, varias zonas a nivel mundial sufrirán una grave tensión hídrica (WWC, 2000):

- o La disponibilidad promedio anual per cápita disminuirá de 6,600 m³ a 4,800 m³.
- o En países áridos y semiáridos: 3,000 millones de personas dispondrán de sólo 1,700 m³/habitante/año.
- o Las extracciones de agua de 3,800 km³, registradas en 1995, se incrementarán a 4,300 y 5,000 km³ para el 2025.

1.3 Vulnerabilidad hídrica

Es conveniente plantear el panorama mundial de la disponibilidad de agua en términos de la vulnerabilidad hídrica. El término vulnerabilidad en el sentido de la Real Academia Española, se entiende como calidad de vulnerable, esto quiere decir, que puede ser herido o recibir lesión, física o moralmente. Mientras que, más recientemente la ISDR (*International Strategy for Disaster Reduction*) define vulnerabilidad como un conjunto de condiciones y procesos resultantes de factores físicos y otros, que incrementan la susceptibilidad de una comunidad ante impacto de peligro (WWC, 2002).

En general, el alcance de un análisis de la vulnerabilidad de los recursos hídricos reside en tres propósitos primordiales:

- a) La toma de decisiones para la protección y manejo de los recursos hídricos.
- b) La caracterización de zonas susceptibles a escasez hídrica.
- c) Protección de los recursos hídricos afectados por la actividad humana.

La identificación de la vulnerabilidad de los recursos hidráulicos en diferentes regiones, debe considerar factores como:

- o Crecimiento poblacional.
- o Autosuficiencia alimenticia.
- o Desarrollo industrial.
- o Cambio climático.

Kulshreshtha (1998) tomando en cuenta los factores antes mencionados, realizó un análisis de la vulnerabilidad de los recursos hidráulicos a nivel mundial, identificando los siguientes niveles de daño:

- o Daño a los mismos recursos hídricos, como el deterioro en cantidad y calidad, o cambios drásticos en la disponibilidad del agua subterránea.
- o Daño de ecosistemas que dependen del agua, como humedales y hábitat asociados.
- o Daño a los seres humanos, frente a eventos extremos como inundaciones, sequías así como frente a enfermedades provocadas por el agua.

- o Daño a actividades socioeconómicas frente a impactos en los miembros de la sociedad (en términos de costo social del quehacer productivo).

Adicionalmente, Kulshreshtha estableció algunos escenarios producto de la combinación de probables contextos en cuanto a nivel de población, autosuficiencia alimenticia, desarrollo industrial y cambio climático para los años 1990 y 2025:

Escenario	Nivel de Población	Alcance de auto-suficiencia alimenticia	Desarrollo Industrial	Efectos del cambio climático
1	1990	No	Nivel 1990	No
2	1990	Si	Nivel 1990	No
3	2025	No	Nivel 1990	No
4	2025	Si	Nivel 1990	No
5	2025	No	Nivel 2025	No
6	2025	No	Nivel 2025	Si
7	2025	Si	Nivel 2025	Si

Tabla 1.2 Descripción de los escenarios de estudio. Fuente: Kulshreshtha, 1998

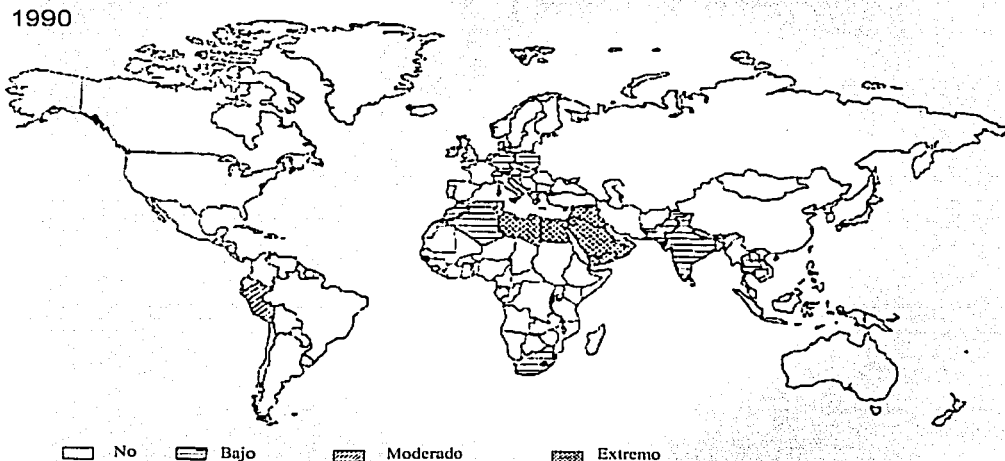


Figura 1.5 Distribución de la vulnerabilidad hídrica en varios países en el mundo bajo el primer escenario. Año 1990. Fuente: Kulshreshtha, 1998

Los cuatro niveles de vulnerabilidad hídrica son (ver figura 1.5):

- (i) **No** existe vulnerabilidad hídrica (*No*), cuando no existe una situación de escasez de agua.
- (ii) Vulnerabilidad **baja** (*Low*), cuando una región muestra escasez periódica y espacial, que puede ser superada con medidas de gestión apropiadas.

- (iii) Vulnerabilidad **media** (*Moderate*), cuando un país manifiesta una situación de estrés hídrico en el tiempo y sobre varias actividades económicas, en varias regiones.
- (iv) Vulnerabilidad **extrema** (*Extreme*), la cual es una situación de carencia que afronta el país.

Escenarios en estudio	Estado de vulnerabilidad hídrica				Valor total
	No	Bajo	Medio	Extremo	
Distribución del número de países					
1	107	18	6	14	145
2	96	15	13	21	145
3	94	9	15	27	145
4	81	13	14	37	145
5	86	15	16	28	145
6	35	7	21	37	145
7	35	9	24	37	145

Tabla 1.3 Distribución del número de países según estado de vulnerabilidad hídrica bajo escenarios alternativos de estudio. Fuente: Kulshreshtha, 1998

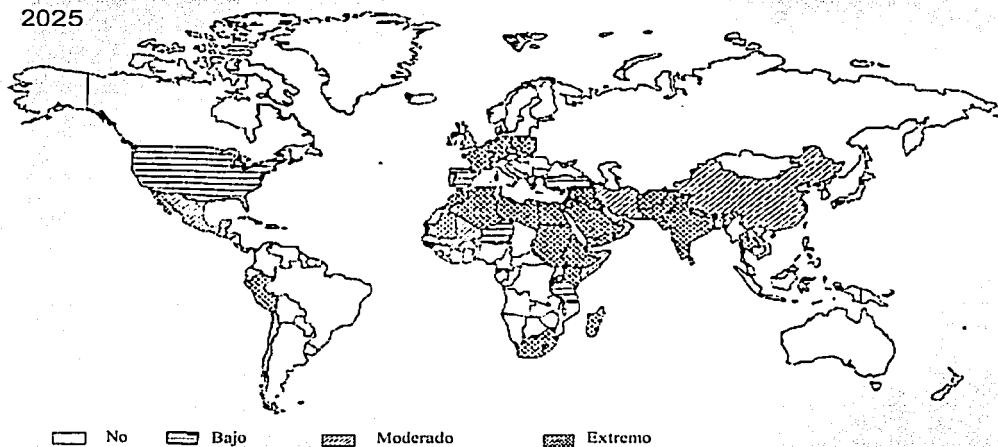


Figura 1.6 Distribución de la vulnerabilidad hídrica en varios países en el mundo bajo el escenario seis. Año 2025. Fuente: Kulshreshtha, 1998

Los resultados del estudio de vulnerabilidad hídrica sugieren que las regiones con mayor riesgo son las zonas áridas y que en la actualidad presentan baja vulnerabilidad hídrica. Sin embargo tales condiciones no son absolutas, con una mejor tecnología, educación y con un adecuada gestión del agua, algunos de los efectos adversos pueden ser revertidos.

Respecto a los factores que influyen en la vulnerabilidad de los recursos hídricos se puede señalar que el crecimiento poblacional parece ser el principal responsable de los cambios en

el grado de vulnerabilidad hídrica. Considerando únicamente éste factor, 2.3 billones de personas (ó aprox. el 30% de población pronosticada al 2025) estarían empeorando su estado en varias regiones del mundo. Por otro lado, el factor de desarrollo industrial no tiene el mismo tipo de impacto sino más bien parece afectar a la calidad del agua. Mientras que el cambio climático acentuará probablemente el estado desmejorado de la vulnerabilidad hídrica en muchas regiones llegando a 2.2 billones de personas al extremo de escasez. Sin embargo, un análisis país por país sugiere que el cambio climático puede producir efectos benéficos en aquellas regiones donde el grado de vulnerabilidad hídrica no es alto (Kulshreshtha, 1998).

1.4 Principios básicos para la gestión del agua

En términos generales se suele entender por gestión integrada, el considerar todos los factores que inciden en el proceso de gestión del agua, es decir los factores ambientales, sociales, legales, institucionales, de medio ambiente y no sólo el aprovechamiento del agua, como era usual.

Recientemente, el Comité Consultivo Técnico de la Asociación Mundial del Agua (GWP) propuso la siguiente definición (GWP, 2000): *La Gestión Integrada del Agua es un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.* No obstante, ha reconocido que el concepto de gestión integral de los recursos hídricos es ampliamente debatido.

Por estas razones, resulta conveniente enunciar la gestión integral del agua como una serie de principios rectores. De acuerdo con Martínez-Austria (2002), las versiones más reconocidas de estos principios son las siguientes:

El IRC *International Water and Sanitation Centre* (Viscsher *et al.*, 1999), propone los siguientes principios para la gestión integral de los recursos hidráulicos:

1. Son esenciales la conservación de las fuentes de agua y de las cuencas de captación.
2. La asignación del agua debe realizarse en acuerdo entre todos los actores, en un marco nacional.
3. La gestión debe realizarse al nivel más local posible.
4. La construcción de capacidades es la clave de la sustentabilidad.
5. Se requiere la participación de todos los actores.
6. Es esencial el uso eficiente del agua.
7. Debe tratarse al agua como un bien económico y social.
8. Es importante impulsar un balance de género.

La Conferencia de Dublín sobre Agua y Medio Ambiente (1992) propuso los comúnmente conocidos "Principios de Dublín", que enuncian lo siguiente :

1. El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente.
2. El desarrollo y manejo del agua debe estar basado en una proposición participatoria, que envuelva a usuarios, planeadores y tomadores de decisión de todos los niveles.

3. La mujer planea una parte central en la provisión, manejo y cuidado del agua.
4. El agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debe ser reconocida como un bien competitivo.

La Oficina Internacional del Agua (Donzier, 2000), de Francia, propone que los principios fundamentales para una gestión moderna del agua son los siguientes:

1. Una visión global e integrada
2. Clarificar las responsabilidades
3. Organización adecuada a escala de las grandes cuencas hidrográficas y de los acuíferos
4. Participación directa y activa de las diferentes administraciones y colectividades territoriales, a través de consejos y parlamentos del agua
5. Lucha contra el despilfarro y la prevención de la contaminación permanente o accidental
6. Aplicación del principio "usuario contaminador-pagador"
7. Crear nuevas capacidades de formación de recursos humanos
8. Mejoramiento del conocimiento

Existen intentos de algunos países por crear los principios en las propias condiciones y el contexto de cada región. En México, si bien no se han enunciado de manera explícita los principios de la gestión integral del agua, recientemente la CNA (2001), ha definido los siguientes principios rectores de la política hidráulica:

1. El agua es un recurso estratégico de seguridad nacional
2. La unidad básica para la administración del agua es la cuenca hidrológica, ya que es la forma natural de ocurrencia del recurso
3. Las decisiones se toman con la participación de los usuarios al nivel local, en función de la problemática a resolver
4. Los planes y programas deben incorporar las visiones de todos los copartícipes.

Para la gestión integral del agua en México, se han propuesto los siguientes principios rectores (Martínez-Austria, 2002):

- o Conservar las fuentes de agua, especialmente acuíferos y lagos hoy contaminados o sobreexplotados, así como de las fuentes de captación.
- o Participación de todos los interesados en la toma de decisiones, al nivel más local posible.
- o El agua debe administrarse por cuencas hidrológicas.
- o Conservar de manera integral los recursos naturales asociados al agua, especialmente los suelos y bosques.
- o Promoción del uso eficiente del agua y el reúso.
- o Tratar el agua como un bien económico y social.
- o Establecer leyes, reglamentos y normas claras; y asegurar su cumplimiento.
- o Promover la ciencia y la tecnología del agua.

La diferencia entre las versiones de los principios de la gestión integrada son atribuibles, más que a una divergencia conceptual fundamental, a las diversas condiciones ambientales y sociales de cada región en la que deben aplicarse.

En resumen, tanto los escenarios de disponibilidad futura como las nuevas condiciones en el manejo del agua, plantean una importante modificación en el paradigma de los recursos hidráulicos: el problema principal del futuro no será el aprovechamiento de las fuentes de agua, ya explotadas a niveles cercanos a su máximo; sino la gestión del agua (ver por ejemplo: Martínez-Austria, 2001; Buras, 2000; y Gleick, 2000).

Esta nueva perspectiva en torno a la administración del agua, requiere la incorporación de herramientas científicas nuevas. En ese sentido, el presente trabajo fundado en el pensamiento sistémico y la dinámica de sistemas, plantea un enfoque holístico en el manejo de recursos hídricos. Parte de una cuenca como unidad modular de los procesos hidráulicos y actividades humanas, aplica la teoría de sistemas como herramienta metodológica de análisis y genera un diagrama causal de interrelación entre variables del sistema, donde se reconocen comportamientos recurrentes denominados *Arquetipos Sistémicos de la Gestión Integral del Agua*.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 2

Introducción a la quinta disciplina y los arquetipos sistémicos

2.1 Introducción

La teoría de sistemas presenta un estudio metodológico de la realidad, mediante la observación del objeto de estudio como un todo (sistema), y la interacción entre sus elementos. Un sistema es una colección de elementos que interactúan, afectándose recíprocamente a lo largo del tiempo y operando con un propósito común.

La palabra sistema proviene del griego *syn ístemis*^{*}, que originalmente significaba “colocar con” o “colocar junto” y que hacía referencia a construcciones totales, organizadas y perfectamente coordinadas que conforman la esencia de las cosas. Así, un sistema será un conjunto de partes que interactúan unas con otras para funcionar como un todo. Son sistemas comunes: el sistema circulatorio humano, el ciclo hidrológico, los sistemas ecológicos, los sistemas sociales, entre otros.

^{*} Una definición alternativa, también de interés, es “conjunto de cosas que ordenadamente relacionadas entre sí contribuyen a un fin determinado”.

Los sistemas complejos – dinámicamente complejos, como se definirá más adelante – requieren de herramientas especiales para su descripción, conceptualización, definición de variables y su interrelación, y su modelación.

Los objetos y personas en un sistema se relacionan a través de ciclos de retroalimentación, donde un cambio en una variable afecta a otras variables en el tiempo, lo que vuelve a afectar a la variable original y así sucesivamente. Las herramientas del pensamiento sistémico -diagramas del ciclo causal, arquetipos y modelos informáticos- permiten describir con soltura las interrelaciones, pues se basan en el concepto teórico de los procesos de realimentación (Senge *et al.*, 1995).

2.2 La quinta disciplina

Se denomina también así al pensamiento sistémico, por ser la quinta de las cinco disciplinas que rigen una organización inteligente y que engloba a las demás.

En un sentido genérico, el pensamiento sistémico abarca una amplia y heterogénea variedad de métodos, herramientas y principios, todos orientados a examinar la interrelación de fuerzas y componentes que forman parte de un proceso común.

El pensamiento sistémico es una disciplina para ver totalidades, patrones de comportamiento y relaciones en sistemas complejos, que abarcan campos tan diversos como las ciencias físicas y sociales, la ingeniería y la administración de empresas.

Este pensamiento sistémico distingue dos tipos de complejidad: la de detalles y la dinámica. Y es ésta segunda la que interesa, la que implica que la conexión entre causa y efecto obedece a causas sutiles y donde los efectos de una intervención en el tiempo no son obvios.

Así, una visión sistémica brinda:

- o La capacidad de “ver los detalles sin perder el panorama”.
- o Comprender porqué al atacar un problema se pueden agravar otros.
- o Atacar las verdaderas causas de un problema.
- o Encontrar las relaciones entre los elementos o factores de un problema, que definen la “estructura” del problema o situación problemática.

Descartes y Bacon presentaron un marco analítico de entendimiento y un método científico que en la actualidad sigue en vigencia. Newton, con el descubrimiento de las leyes del movimiento y la gravedad universal, proporcionó un paradigma de comprensión del universo. El paradigma newtoniano engloba esencialmente una relación lineal de causa y efecto. Un paradigma que es reforzado por la forma de observación de eventos diariamente.

La dificultad con este paradigma es que provee una perspectiva de corto plazo muy limitada para entender cómo realmente trabajan las cosas.

En las ciencias administrativas, se conocen como “tecnologías de componentes” a las cinco disciplinas que construyen una organización inteligente. A continuación tales disciplinas se explican brevemente:

Dominio personal. Disciplina que permite aclarar y ahondar continuamente la visión personal, concentración de energías, desarrollo de la paciencia y visión objetiva de la realidad.

Modelos mentales. Son supuestos hondamente arraigados, generalizaciones e imágenes que influyen sobre el modo de actuar y de comprender el mundo.

Construcción de una visión compartida. Supone aptitudes para configurar “visiones del futuro” compartidas, que propicien un compromiso genuino antes que mero acatamiento.

Aprendizaje en equipo. Comienza con el diálogo para introducir en un auténtico pensamiento conjunto.

Pensamiento sistémico. Disciplina de ver totalidades, interrelaciones en vez de cosas y patrones de comportamiento; en vez de “fotografías instantáneas”. Facultad de ver “estructuras” como trasfondo de situaciones complejas de bajo y alto impacto para el sistema en estudio. Es una perspectiva de observación de patrones de cambio e interrelaciones sistémicas. Entonces, la esencia del pensamiento sistémico es un cambio de enfoque, una reestructuración del pensamiento.

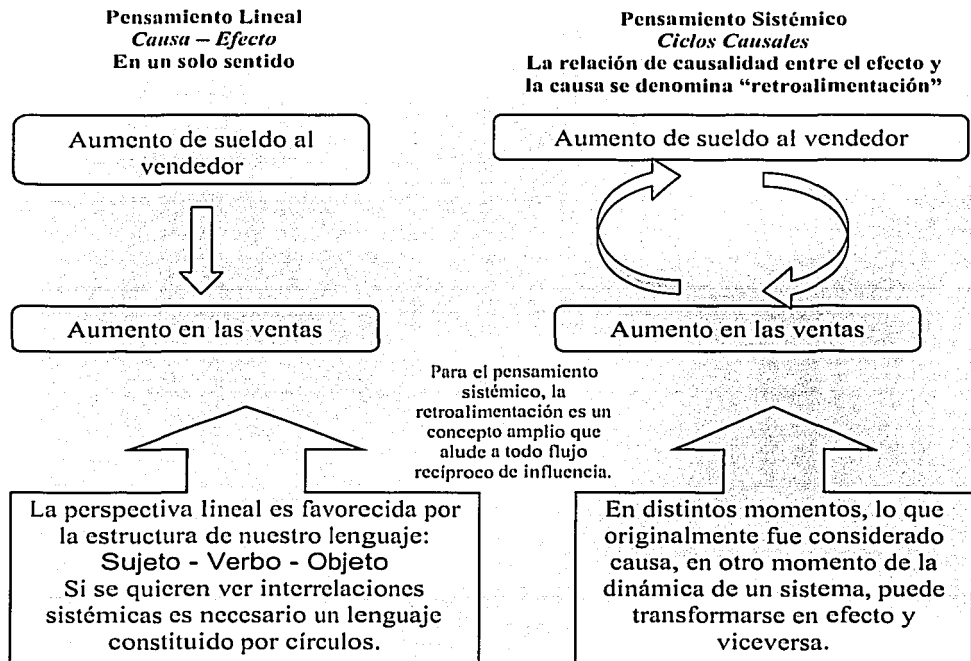


Figura 2.1 Ejemplo comparativo entre el pensamiento lineal y el pensamiento sistémico

En la figura adjunta, se observa un paralelo entre dos formas de razonamiento (lineal y sistémico) aplicadas a un caso particular. Bajo el pensamiento lineal, caracterizado por una lógica unidireccional, la relación entre el sueldo de un vendedor y las ventas en una organización, es de causa a efecto, esto es directamente proporcional y en una sola dirección. De igual modo, bajo el enfoque sistémico existe una relación de proporcionalidad pero simultánea entre ambas variables, lo que genera un ciclo retroalimentador o causal (figura 2.1).

La forma de pensar sistémica es altamente conceptual, envuelve una vista panorámica de cualquier situación o fenómeno y deduce la manera cómo los sistemas operan, por lo que permite:

- o Ver interrelaciones entre las partes en vez de relaciones lineales de causas y efectos.
- o Ver procesos de cambio más que imágenes estáticas.

*El pensamiento sistémico es la quinta disciplina, la que integra a las demás fusionándolas en un cuerpo coherente de teoría y práctica.**

2.3 Dinámica de sistemas

Es una metodología de estudio y manejo de sistemas retroalimentadores complejos, como se observan en sistemas sociales, económicos y naturales. Aunque se ha usado para prácticamente todo tipo de sistemas.

De modo simple, la dinámica de sistemas se enfoca en el flujo de retroalimentación (información transmitida y replicada) que ocurre dentro de las partes de un sistema, y los comportamientos del mismo que resultan de tales flujos. Fue desarrollada en el Instituto Tecnológico de Massachussets hacia 1950 (Forrester, 1961) y se caracteriza por ser más rigurosa que el pensamiento sistémico. La dinámica de sistemas es precursora del pensamiento sistémico, mismo que toma los principios del comportamiento sistémico deducidos por la dinámica para casos prácticos.

Es motivo de la dinámica de sistemas, el estudio de los procesos de refuerzo, que son flujos de retroalimentación que generan crecimiento exponencial o colapso y los procesos de balance, que son flujos retroalimentadores que mantienen la estabilidad del sistema. Ambos procesos son frecuentes en fenómenos reales, como: el crecimiento poblacional mundial, epidemias con microbios nuevos, el oscilador armónico, entre otros.

La retroalimentación se refiere a la situación en que A afecta a B y B afecta recíprocamente a A, a través de una cadena de causas y efectos.

Únicamente el estudio de todo el sistema, con reconocimiento de ciclos retroalimentadores propone resultados mejor ajustados a la realidad. Así mismo, la dinámica de sistemas estudia el impacto de las demoras en el sistema. Especialmente si las implicaciones

* Peter M. Senge (1990), *La quinta disciplina - El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*, Editorial Granica.

causadas toman tiempo prolongado en originar efectos y cuando causa y efecto están físicamente alejados. Tal vez la parte más interesante de la dinámica de sistemas está en la modelación mediante programas de cómputo con los cuales se puede inducir o conocer el comportamiento del sistema ante cambios propuestos.

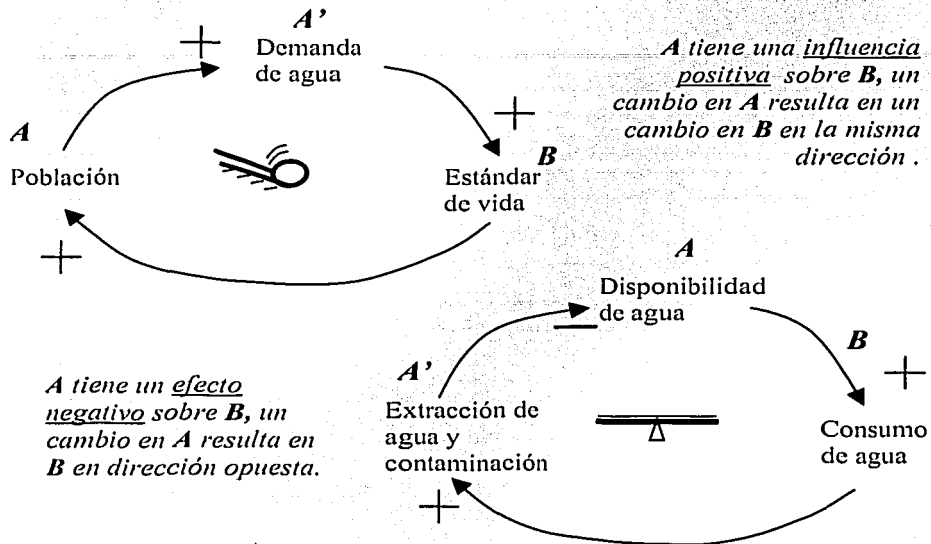


Figura 2.2 Ejemplos de ciclos retroalimentadores positivo y negativo aplicados a la problemática del agua. Fuente: Camino, 2002

El campo de la teoría de sistemas ha generado un grupo de herramientas que admiten:

1. Representar gráficamente la comprensión de la estructura y conducta de un sistema.
2. Comunicar con otras personas este concepto.
3. Diseñar intervenciones de alto nivel para el comportamiento problemático del sistema.

Las herramientas que utiliza incluyen diagramas causales, gráficos en el tiempo, diagramas *stock-flow* y arquetipos sistémicos.

La dinámica y el pensamiento sistémico confeccionan diagramas causales desde la misma perspectiva, pero la dinámica construye y prueba modelos de simulación computacional, así como políticas de acción en el modelo.

2.3.1 Círculos de causalidad

Hay situaciones donde las descripciones lineales simples bastan y buscar procesos de retroalimentación es una pérdida de tiempo. Pero no cuando se trata de problemas de complejidad dinámica, en éstos, la retroalimentación está siempre presente.

En un diagrama sistémico o de círculos de realimentación se plasma cada círculo del sistema. De cualquier elemento de una situación es posible trazar flechas que representen la influencia de éste sobre otro elemento. La habilidad del analista, al leer un diagrama de este tipo, consiste en ver la historia que cuenta el diagrama. En otras palabras, cómo la estructura crea un patrón de conducta determinado (o en una estructura compleja, varios patrones de conducta) y cómo se puede influir sobre ese patrón.

Desde la perspectiva sistémica, el actor humano forma parte del proceso de retroalimentación, no está separado de él. Esto permite *incorporar la evidencia experiencial* de ver que continuamente se recibe influencia de la realidad y se ejerce influencia sobre ella. El concepto de retroalimentación complica el problema ético de la responsabilidad, ya que obliga a abandonar el supuesto de que debe haber un agente individual responsable (como lo establece una visión lineal, por medio de acusaciones de culpabilidad a agentes específicos). Bajo la perspectiva de realimentación se sugiere que todos comparten la responsabilidad por los problemas generados en el sistema. Sin que esto implique que todos ejercen igual impacto en la modificación del mismo.

2.3.1.1 Tipos de retroalimentación

Existen los siguientes tipos de retroalimentación de un sistema:

Retroalimentación de refuerzo o amplificadora (Retroalimentación positiva). Es una situación donde las variables crecen o generan la aceleración de la decadencia.

En los procesos reforzadores un pequeño cambio se alimenta de sí mismo. Todo movimiento se amplifica produciendo más movimiento en la misma dirección. Por ende la conducta que se deriva de un rizo reforzador es crecimiento acelerado o deterioro acelerado y siempre se desplaza hacia un objetivo.

Se pueden distinguir dos tipos de ciclos reforzadores: los viciosos y los virtuosos. Los círculos viciosos se reconocen cuando las cosas comienzan mal y terminan peor. Un ejemplo claro de círculo vicioso fue la carrera armamentista durante la guerra fría. Por otro lado, los círculos virtuosos se refuerzan en dirección positiva.

Nunca se identifica un círculo vicioso o virtuoso por sí mismo. Un ciclo reforzador, por definición, es incompleto. En algún momento se encuentra con un mecanismo compensador que lo limita. Tal vez el límite no aparezca de inmediato, pero está por sentado que aparecerá y en general hay límites múltiples.

Un ejemplo de ciclo reforzador se observa en algunas empresas lucrativas como las purificadoras de agua. Cuando se estimula un aumento en la publicidad, se incrementan los niveles de ventas y por consiguiente aumentan los ingresos. Éstos últimos así mismo permiten mayor inversión en publicidad, consecuentemente mayor cantidad de ventas e ingresos y así sucesivamente (ver figura 2.3).

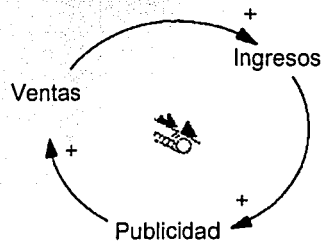


Figura 2.3 Ejemplos de ciclo reforzador. Fuente: Senge, 1990

Los comportamientos asociados a estos ciclos reforzadores aplicados al ejemplo anterior, se observan en la figura 2.4.

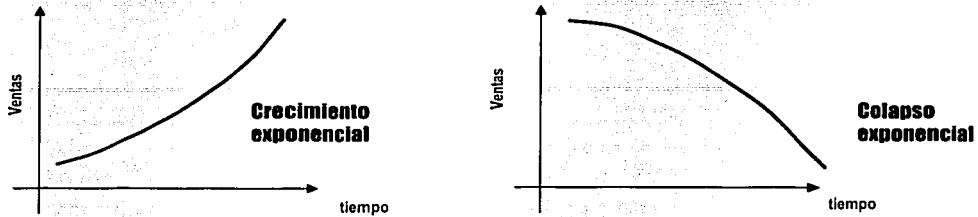


Figura 2.4 Evolución en el tiempo de las ventas en empresas lucrativas

Los indicadores del círculo o ciclo de refuerzo, suelen ser representados por círculos causales al centro de bola de nieve (figura 2.3), una letra R (por refuerzo) o un signo positivo, encerrado entre paréntesis (+).

Retroalimentación de equilibrio o compensadora (Retroalimentación negativa o estabilizadora). Es una situación que opera cuando hay una conducta orientada hacia las metas. Las metas pueden ser un objetivo explícito o implícito, o simplemente un hábito perjudicial de apego.

Un sistema compensador busca la estabilidad, es decir opera para reducir la diferencia entre lo deseado y lo existente, aún cuando el objetivo deseado varíe con el tiempo.

Estos procesos generan conductas problemáticas si pasan inadvertidos, lo que generalmente ocurre por el desconocimiento de la existencia del proceso.

Se presentan multitud de círculos de retroalimentación compensadora o equilibrante en los seres vivos, por ejemplo cuando un organismo vivo trata de compensar su nivel de agua, con respecto al necesario para su supervivencia. Éste va ingiriendo poco a poco el agua que necesita, hasta alcanzar la cantidad adecuada para su supervivencia (ver figura 2.5).

El comportamiento asociado a este ciclo compensador, se ve a la derecha de la figura:

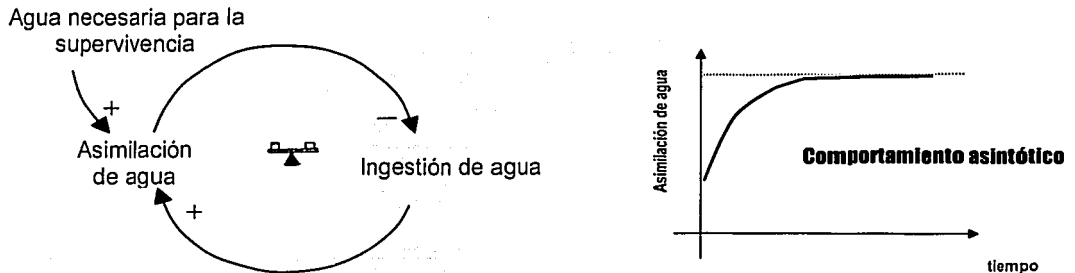


Figura 2.5 A la izquierda, ejemplo de ciclo estabilizador en seres vivos. A la derecha, evolución en el tiempo de la asimilación de agua

Los procesos compensadores siempre están vinculados a un objetivo, es decir, una restricción o meta que a menudo es fijada implícitamente por las fuerzas del sistema. Cuando la realidad actual no concuerda con el objetivo del proceso estabilizador, la brecha resultante (entre el objetivo y el desempeño real del sistema) genera una presión que el sistema no puede ignorar. Cuanto mayor sea la brecha, mayor es la presión.

Los indicadores del ciclo compensatorio son: balanza (ver figura 2.6), la letra B o un signo negativo encerrado entre paréntesis (-).

Los signos positivos o negativos en flechas de influencia son utilizados en cualquier tipo de retroalimentación. Los signos negativos indican que los elementos son inversamente proporcionales (sentido opuesto), mientras que los positivos refieren relaciones de proporcionalidad directa (mismo sentido).

Demoras. Se presentan tanto en los ciclos reforzadores como en los compensadores. Son interrupciones en el flujo de influencia que hacen que las consecuencias de los actos se lleven a cabo gradualmente.

El efecto de una variable sobre otra, cuando lleva tiempo provoca demoras. La demora puede ejercer una enorme influencia en un sistema, acentuando la repercusión de otras fuerzas. Esto sucede porque las demoras son sutiles y a menudo se ignoran, subestiman o no se comprenden, pero el no considerarlas puede conducir a la inestabilidad y al colapso, especialmente si son prolongadas.

Un ejemplo de un círculo estabilizador con demora se presenta al mejorar la calidad de los servicios en una organismo operador de agua. Para producir el efecto de satisfacción de usuarios, debe transcurrir un período de tiempo que puede ser prolongado.

El comportamiento de la variable de estado (satisfacción de usuarios) se asocia al siguiente grafico.

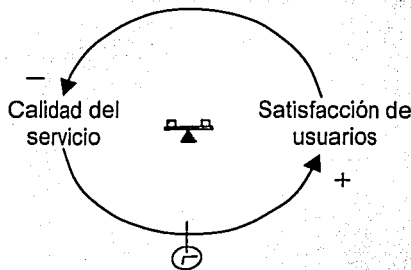


Figura 2.6 A la izquierda, ejemplo de ciclo estabilizador con demora. A la derecha, evolución en el tiempo de la cantidad de clientes

Las demoras se identifican por dos ó una línea transversal en las flechas de influencia. Sin embargo estas líneas no establecen cuánto tiempo específico durará la demora. Sólo se sabe que puede ser tan prolongada como para tener importancia.

2.4 Arquetipos sistémicos

Un arquetipo es una estructura sistémica recurrente, es decir que se descubre una y otra vez en sistemas reales. La palabra arquetipo proviene del vocablo *arkhetipos*, que significa, el primero de su especie.

Permite construir modelos cualitativos que describen un proceso real, a partir de variables de estado o de control y de sus interrelaciones. Un arquetipo es una representación genérica de un modelo fenomenológico.

Los arquetipos sistémicos fueron desarrollados por *Innovation Associates*, a mediados de los 80s. La dinámica de sistemas dependía de la graficación de circuitos causales complejos y de la modelación por computadora, utilizando relaciones matemáticas para definir variables. En ese entonces se desarrollaron ocho diagramas para ayudar a catalogar las conductas más comunes. Los arquetipos son herramientas accesibles, que permiten construir hipótesis creíbles y coherentes acerca de las fuerzas que operan en los sistemas.

La existencia de estructuras genéricas relativamente simples, que se presentan en forma recurrente en la naturaleza, las profesiones, los negocios y la vida real, concede un mejor entendimiento de diferentes situaciones. Estos modelos son abstracciones, que simulan la realidad haciendo hipótesis simplificadoras.

Las estructuras sistémicas suelen ser invisibles, hasta que alguien las señala. Para el pensamiento sistémico, una estructura es la configuración de interrelaciones entre los componentes claves del sistema. En una empresa puede incluir la jerarquía y el flujo de procesos, pero también, actitudes, percepciones, calidad de los productos, los modos en que se toman las decisiones y otros muchos factores más.

La mayoría de las situaciones complejas pueden ser representadas por diagramas causales en los que intervienen más de un ciclo. Estos pueden ser de refuerzo o de balance y su característica es que una o más variables participan en más de un ciclo. Una explicación de los mismos se detalla en el capítulo cuatro.

Los arquetipos más comúnmente usados se muestran a continuación:

2.4.1 Soluciones rápidas que fallan

Este arquetipo se caracteriza por la aplicación de una solución que puede ser eficaz en el corto plazo pero refleja consecuencias imprevistas en el largo plazo que requieren continuar aplicando la solución original.

El tema central de este arquetipo es que casi toda decisión implica consecuencias de largo alcance y de corto alcance y a menudo ambas son diametralmente opuestas. Pero las consecuencias involuntarias de la solución (el círculo vicioso del ciclo reforzador) empeoran el desempeño que procuramos mejorar.

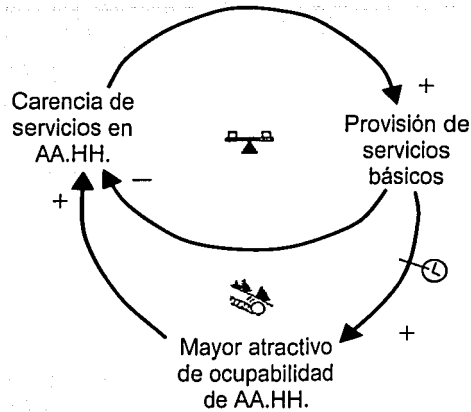


Figura 2.7 Ejemplos de la estructura "soluciones rápidas que fallan" en la problemática de los cinturones de pobreza en ciudades

El comportamiento está asociado a una disminución repentina del síntoma, con un repunte (casi siempre peor), de la situación que se deseaba resolver.

Un ejemplo de este tipo de comportamiento se presenta ante la presencia de cinturones de pobreza en torno a las ciudades. Estas áreas adoptan diversos nombres por regiones, como favelas, ciudades perdidas, pueblos jóvenes, asentamientos humanos (AA.HH.), etc. Estas zonas recientemente pobladas presentan carencia de servicios, la solución inmediata es la provisión de servicios urbanos básicos, con lo cual se hacen más atractivas para la ocupación y la consiguiente mayor inmigración hacia la zona. Generando un ciclo retroalimentador positivo por optar por una solución inmediata.

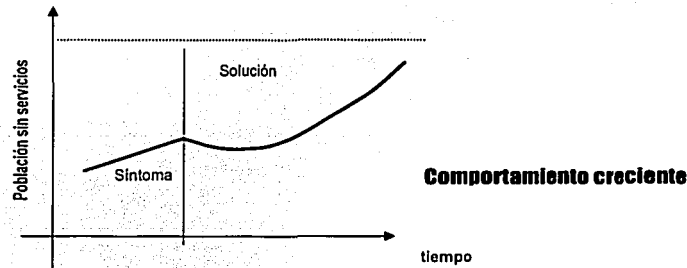


Figura 2.8 Comportamiento de la variable de estado "población sin servicios" en la estructura "soluciones rápidas que fallan"

Como se observa en la gráfica contra el tiempo, al principio la solución rápida parece surtir efecto, pero a medida que pasa el tiempo esta solución provoca consecuencias indeseables

que a posteriori incrementan el síntoma, es decir poblaciones sin servicios. Una solución mejor planteada podría ser la provisión de servicios pero en zonas rurales de donde usualmente provienen los inmigrantes hacia las ciudades perdidas.

Este tipo de recurso inmediato se puede usar sólo para ganar tiempo mientras se encuentra y se elimina el verdadero problema. Es importante tener en mente que el síntoma no es más que una manifestación de una situación problemática.

Otro ejemplo común de esta conducta, se manifiesta cuando el gobierno concede las demandas que exigen los pobladores por la vía del conflicto social, esto es, a través de huelgas, paros o bloqueo de carreteras. Esta concesión soluciona inmediatamente el problema que los mismos pobladores en protesta suscitan, pero a la larga estimula a que más gente opte por este recurso.

2.4.2 Desplazamiento de carga

El arquetipo de desplazamiento de carga se descubre cuando existe un problema subyacente que genera problemas que reclaman atención. Pero el problema de fondo es engorroso, difícil de abordar o es costoso abordarlo, entonces se procede a eliminar el síntoma de un problema, sin atacar la causa fundamental que lo produce. La solución sintomática genera consecuencias no deseadas (efectos laterales) que bien pueden reforzar el problema fundamental o reducir la eficacia de las acciones correctivas de fondo.

Un arquetipo de desplazamiento de carga, al igual que una situación de soluciones rápidas que fallan, suele comenzar con un síntoma que insta a alguien a intervenir en su solución. La solución es evidente e inmediata, y pronto elimina el síntoma, pero desvía la atención respecto del problema real o fundamental, que se debilita cuando se le presta menos atención. Esto refuerza la percepción de que no hay mas salida que una solución que ataque los síntomas.

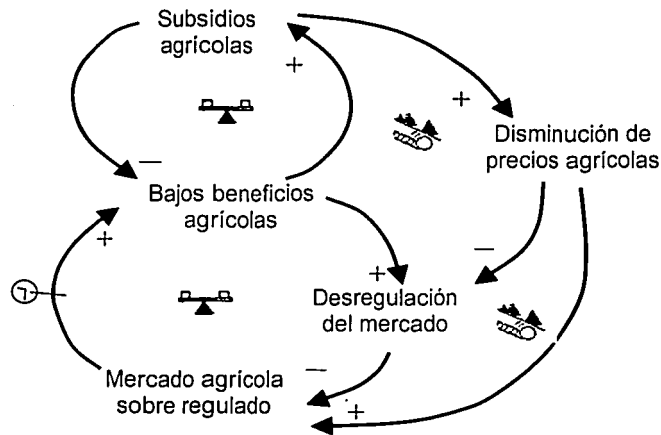


Figura 2.9 Ejemplo de una estructura de "desplazamiento de carga" en la agricultura

Un ejemplo de este arquetipo se muestra en la figura 2.9. En algunos países desarrollados, los bajos beneficios agrícolas son restablecidos brindando altos subsidios agrícolas, lo que genera una disminución de precios de los productos en el mercado internacional. Esto provoca que se tenga un mercado sobre regulado y que se requieran de mayores subsidios. Lo que a su vez provoca una disminución de los precios agrícolas, con el consiguiente empobrecimiento de los agricultores sin subsidio y por otro lado a la depredación de recursos.

En muchas estructuras de este tipo, existen ciclos reforzadores adicionales que degradan el sistema hasta configurar un patrón "adictivo". La adicción se vuelve peor que el problema original, porque causa estragos en la aptitud para enfrentar el síntoma.

Existen tres pautas de conducta simultáneas en una situación como ésta. La solución rápida asciende, especialmente cuando se contrae la adicción. El síntoma oscila entre el ascenso y el descenso, pero siempre elevándose gradualmente. El comportamiento está asociado a un crecimiento del síntoma o un decremento del desempeño del sistema, existiendo cada vez mayor necesidad de subsidio y un decremento de la capacidad para solucionar el problema fundamental, que es una desregulación del mercado.

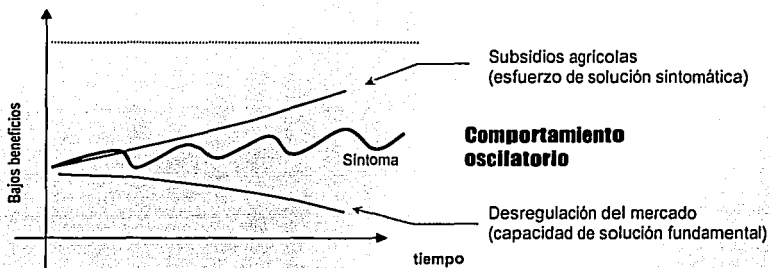


Figura 2.10 Evolución en el tiempo de la variable de estado sintomática "bajos beneficios agrícolas" y de la capacidad de solución del problema

El principio de actuación consiste en concentrarse en la solución fundamental y si la solución sintomática es imperativa, solamente se debe usar para ganar tiempo mientras se aplica la solución fundamental.

2.4.3 Erosión de metas

Este arquetipo consiste en fijar una meta al inicio de un proyecto, que a medida que pasa el tiempo se vuelve difícil de alcanzar, por lo que se decide reducirla al no ver los resultados esperados. Correspondería a una estructura de desplazamiento de carga donde la solución de corto plazo significa el deterioro de una meta fundamental de largo plazo.

Un ejemplo de este tipo de comportamiento, se observa en los organismos operadores de los sistemas hidráulicos. Cuando éstos buscan alcanzar una amplia cobertura de servicios y eficientar sus estructuras hidráulicas.

Al principio se proponen metas altas, proveer a todos los pobladores de servicios básicos: abastecimiento de agua y alcantarillado, y servir con una eficiencia global próxima a 100%.

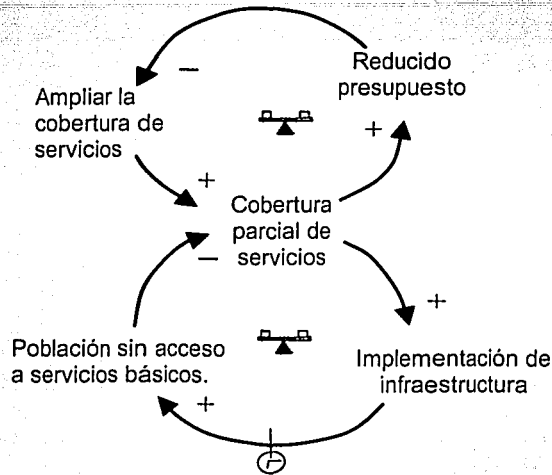


Figura 2.11 Ejemplo de una estructura de "erosión de metas" aplicada a la problemática de poblaciones sin acceso a servicios básicos

Pero estas metas lamentablemente tienen múltiples límites de crecimiento, tales como: presupuesto reducido por un inadecuado régimen de tarifas de cobro, carencia de programas de mantenimiento, falta de equipo apropiado, etc.

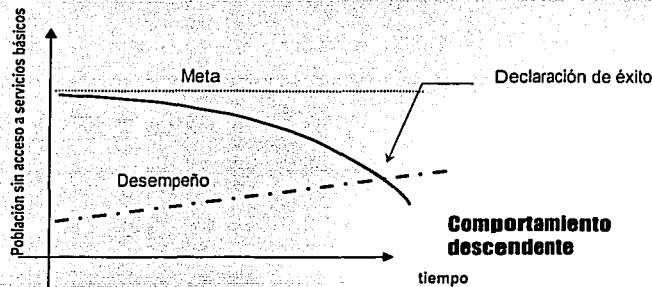


Figura 2.12 Desempeño del sistema a través del tiempo, con respecto a la meta inicial

El comportamiento está asociado a resultados que siguen sin ser los esperados, hasta que la presión para reducir la meta sube y se reduce. Finalmente, se presenta el resultado del proyecto como un éxito, porque se logró la meta, pero fue una meta erosionada.

El principio de actuación, consiste en sostener la visión de largo plazo, (lo que implica resistir la presión de reducir la meta), enfatizar con la gente las disciplinas del dominio personal y de visión compartida.

2.4.4 Límites del crecimiento

Este arquetipo se produce cuando una organización crece sin que se ponga atención en invertir en sus recursos y en la infraestructura que necesitará a futuro, para mantener su ritmo de crecimiento. Finalmente el éxito se acaba y, aunque se siga presionando, el sistema ya no responde.

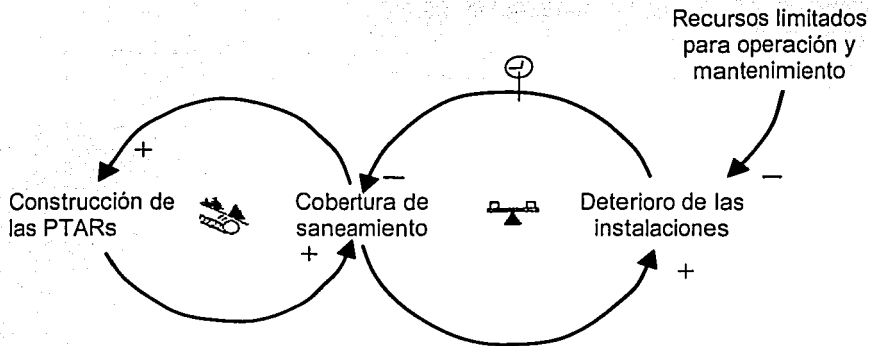


Figura 2.13 Ejemplo de una estructura tipo "límite de crecimiento" en la construcción de las PTARs

Un muestra se observa en la construcción de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs). Inicialmente se realiza una fuerte inversión para su construcción, posibilitando una cobertura de saneamiento mayor, pero dado que no se invierte en operación y mantenimiento de las estructuras implementadas, se produce el deterioro de las instalaciones y posterior colapso de las mismas.

El comportamiento está asociado a un rápido crecimiento en el desempeño del sistema, para luego estancarse cuando llega el límite. En ocasiones el estancamiento se convierte en declinación del desempeño.

En todo aspecto de la vida, las pautas de crecimiento y los límites se combinan de diversas maneras. A veces predomina el crecimiento, a veces predominan los límites, a menudo el grado de influencia oscila entre uno y otro. Este prototipo sólo muestra un límite de crecimiento, existe otro arquetipo denominado "múltiples límites de crecimiento" que muestra más de un límite.

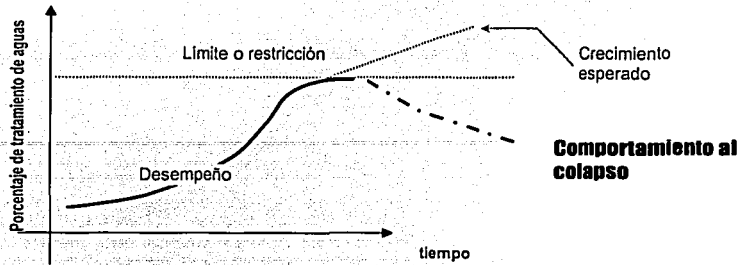


Figura 2.14 Comportamiento evolutivo de la variable “% de tratamiento de aguas” frente al crecimiento esperado

Es recomendable no presionar el proceso de refuerzo, porque no se conseguirá mucho. Mejor es identificar y procurar eliminar o debilitar el proceso limitativo.

2.4.5 Escalada

Esta estructura se da, cuando dos personas u organizaciones entienden que su bienestar depende de una ventaja relativa de una sobre la otra. Cuando una se adelanta, la otra se siente amenazada y actúa con mayor agresividad para recobrar su ventaja, lo cual amenaza a la primera, aumentando su agresividad, y así sucesivamente.

Dadas dos empresas suministradoras de agua purificada A y B. La amplitud del área de provisión del servicio y por ende de las ganancias de A dependen de las de B.

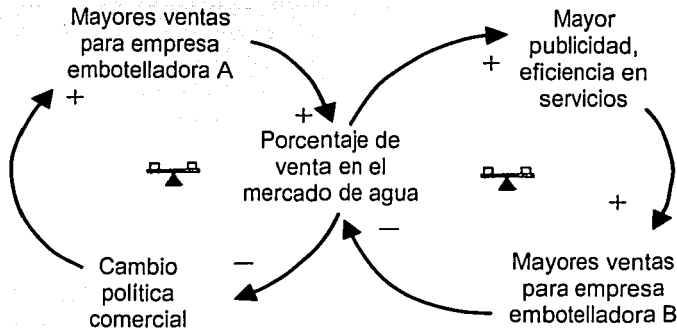


Figura 2.15. Ejemplo de dos empresas de agua purificada en competencia

Ambas compañías compiten dentro de una población limitada que demanda agua de buena calidad. La empresa A para incrementar sus potenciales clientes, mejora sus servicios de

distribución, los tiempos de suministro y la atención al cliente, mientras que la empresa B invierte en publicidad y propaganda. Los resultados que obtendrán serán con altibajos alternativos como se observa en la figura.

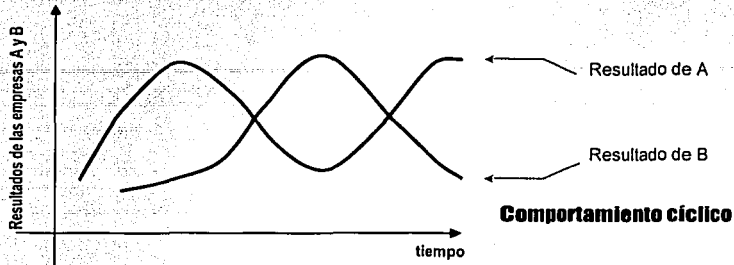


Figura 2.16 Comportamiento de los resultados alternativamente crecientes y decrecientes de ambas empresas

El síntoma asociado es “Si nuestro competidor se estabilizara, podríamos dejar de librar esta batalla para hacer otras cosas”.

La recomendación es buscar el modo de que ambas partes “ganen” o alcancen sus objetivos.

2.4.6 Tragedia de los comunes

Este arquetipo es uno de los más aplicados para explicar el consumo de recursos finitos por varios actores. Su estructura corresponde al uso de un recurso común limitado, pensando sólo en la necesidad individual de cada usuario.

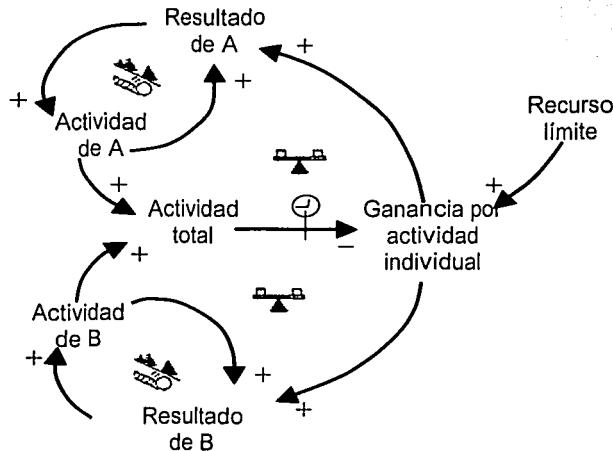


Figura 2.17 Estructura tipo “tragedia de los comunes”. (Ejemplos en el siguiente capítulo)

La conducta esta asociada a un éxito inicial, pero cuando el recurso empieza a ser insuficiente para todos, intensifican sus esfuerzos, acabando con el recurso restante.

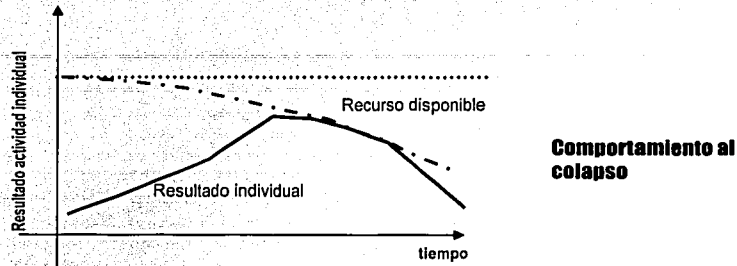


Figura 2.18 Colapso del recurso disponible en una estructura tipo "tragedia de los comunes"

El principio de actuación consiste en educar a todos en el cuidado y mantenimiento del recurso. Idealmente los participantes diseñarán su propio mecanismo autoregulante.

2.4.7 Crecimiento y subinversión

Este arreglo muestra simplemente una estructura de "límite de crecimiento" más elaborada, donde la condición limitadora del crecimiento es parte de otro ciclo balanceador con estándar externo y algunas demoras. La acción creciente que inicializa esta estructura genera un incremento en el desempeño del sistema. El resultado de este desempeño simplemente influencia más en la misma acción creciente, produciendo el crecimiento retroalimentador característico.

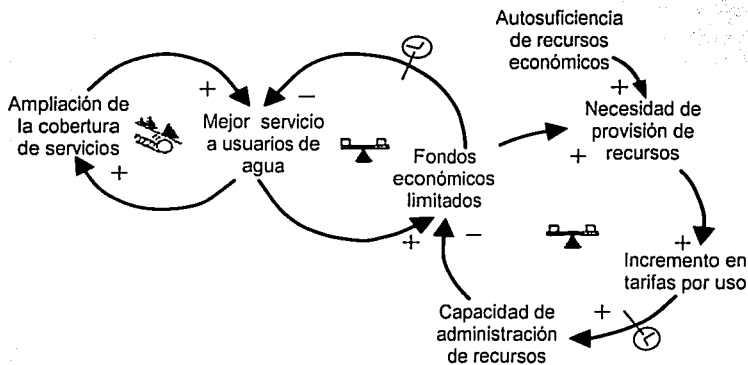


Figura 2.19 Ejemplo de una estructura tipo "crecimiento y subinversión"

El crecimiento nunca va al infinito. Tarde o temprano se produce algún efecto que tiende a limitarlo. Este sistema puede permitir mejor desempeño, si la condición limitadora es reducida. A medida que la condición limitadora interactúa con una condición deseable, esta desarrolla una necesidad percibida de acción que permite alguna suerte de acciones para el incremento de la capacidad, pero actúan después de una demora mientras que la condición limitadora trabaja en un corto plazo eliminando la necesidad percibida de mejora.

Cuando el desempeño de un organismo operador de agua potable es creciente, buscando una mayor cobertura en los servicios y brindando servicio de mejor calidad, usualmente se ve restringido por fondos económicos reducidos que limitan el desarrollo de actividades. Al promover la recaudación de fondos a través del incremento en las tarifas, se busca eliminar esta acción restrictiva pero ocurren las demoras en los pagos o en muchos casos la evasión, desplazando la posibilidad de crecimiento hacia el futuro, si la empresa invierte en "capacidad" adicional. Pero la inversión debe ser intensa y rápida para impedir la reducción del crecimiento, pues de lo contrario no se hará nunca.

A menudo las metas decisivas o las pautas de desempeño se rebajan para justificar la subinversión en tiempo, recursos y aún en esfuerzo. Cuando esto ocurre, hay una profecía autopredicativa donde las metas más bajas conducen a expectativas más bajas, que luego se traducen en un mal desempeño causado por la subinversión.

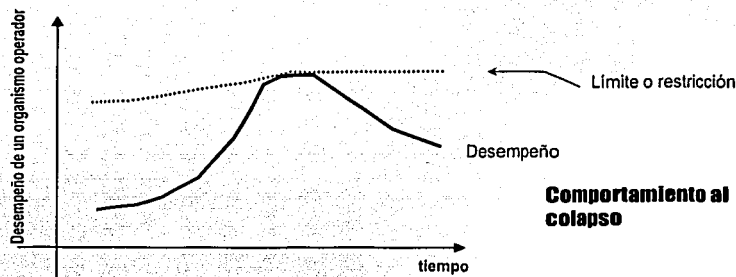


Figura 2.20 Desempeño del sistema con la estructura "crecimiento y subinversión"

La estrategia efectiva para tratar con este arreglo es estudiar las implicaciones del crecimiento antes de que éste genere demandas en el sistema y desarrollar acciones de incremento de la capacidad antes de sean realmente necesarias.

Si hay un potencial genuino para el crecimiento de una empresa, se recomienda incrementar su capacidad de desempeño anticipándose a la demanda, como estrategia para generarla. Además, sostener una visión a largo plazo, sobre todo para evaluar las pautas de desempeño y la capacidad para satisfacer la demanda potencial.

2.4.8 Éxito para quien tiene éxito

Una estructura de este tipo consta de dos ciclos reforzadores que interactúan en de tal forma que crean una sola estructura reforzadora. Se considera una situación donde existen actividades que compiten por recursos limitados.

Se presenta esta estructura entre los Estados de Jalisco y Guanajuato en competencia por el agua compartida.

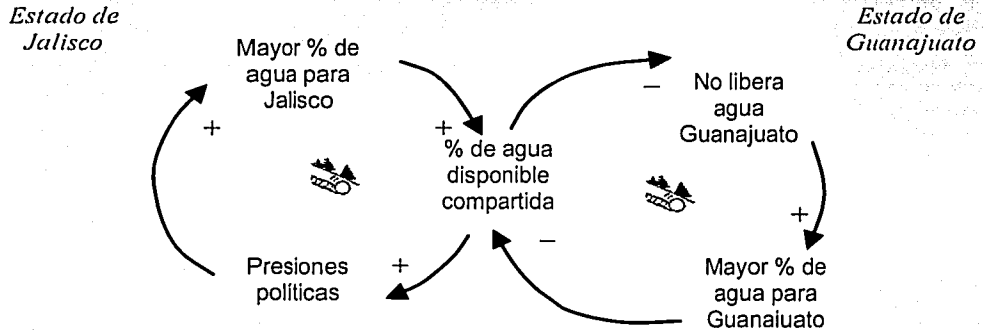


Figura 2.21 Ejemplo de una estructura tipo "éxito para quien tiene éxito" en la competencia por el recurso hídrico

Le corresponde un comportamiento: a mayor éxito, mayor respaldo, con lo cual una de ellas se queda sin recursos, pero puede ser recompuesta por un único ciclo que puede actuar más claramente.

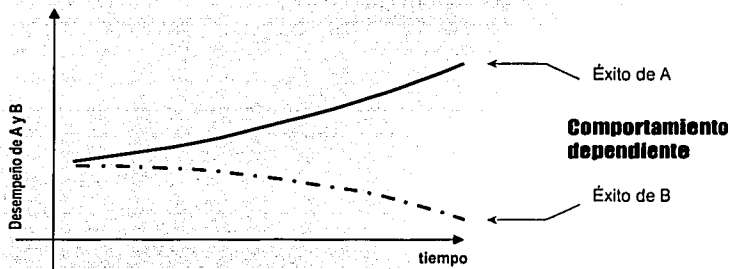


Figura 2.22 Evolución en el tiempo de dos actores de la estructura "éxito para quien tiene éxito"

El síntoma asociado es que una de las dos actividades, grupos o individuos interrelacionados comienza a obtener éxito, utilizando un recurso finito del que el otro también requiere, mientras el otro apenas subsiste.

Existen dos estrategias efectivas para lidiar con esta situación:

1. Identificar los recursos desigualmente distribuidos y balancear su distribución. Buscar la meta global de logro equilibrado de ambas opciones. En algunos casos será necesario romper o debilitar el eslabonamiento entre ambas.
2. Desconectar las dos estructuras reforzadoras de tal manera que no dependan del recurso compartido.

(Un resumen de los arquetipos que se expusieron aquí, se presenta en el apéndice A.)

La retroalimentación reforzadora, la compensadora y las demoras constituyen los elementos básicos de los arquetipos sistémicos o llamados también estructuras genéricas.

El pensamiento sistémico, y en particular los arquetipos sistémicos, constituyen las herramientas conceptuales básicas para avanzar en la aplicación práctica de los principios de la gestión integrada; como se mostrará en el siguiente capítulo con la construcción de arquetipos de la gestión integrada del agua.

Capítulo 3

Arquetipos sistémicos de la gestión integral del agua

3.1 Introducción

Los arquetipos sistémicos, si bien son de aplicación general, deben ser concretados en una situación específica, a fin de demostrar su capacidad de modelación de la problemática de la gestión integrada del agua. Siendo la cuenca, una unidad física básica de todos los procesos naturales y además unidad modular para el desarrollo agrícola, ambiental y socioeconómico, será considerada como plataforma de análisis y unidad de planificación. En México, la cuenca Lerma-Chapala presenta un profundo deterioro ambiental y el mayor impacto socioeconómico nacional por sus dimensiones y por ser el área de concentración de gran parte de la actividad económica mexicana.

El lago de Chapala es un embalse natural que presenta graves problemas de escasez y contaminación del recurso hídrico, es el lago con mayor extensión del país y se encuentra emplazado en la cuenca mencionada. Existe multitud de estudios en torno a la problemática de la cuenca Lerma-Chapala y del lago de Chapala, desde orden técnico, económico, ingenieril hasta científico, pero el problema persiste en cierta medida porque *no se ha adoptado un enfoque sistémico integral para la gestión del recurso.*

Según Jay Forrester, fundador de la dinámica de sistemas, estamos ante el umbral de una nueva era en el avance humano. En el pasado, hubieron períodos caracterizados por la exploración geográfica. Otros períodos lidiaron con la formación de gobiernos nacionales. En otros tiempos se enfocaron en la creación de gran literatura. Más recientemente, hemos atravesado las fronteras de la ciencia y la tecnología, pero éstas son en la actualidad parte rutinaria de la vida. La ciencia ya no es más una frontera. El proceso del descubrimiento científico está ordenado y bien organizado, en base a la metodología de la investigación. La nueva frontera del esfuerzo humano es avanzar en el conocimiento de los sistemas ambientales, económicos y sociales. Los medios están disponibles. La tarea no será tan fácil como en el pasado desarrollo de la ciencia y la tecnología, sin embargo se puede esperar un avance en la comprensión de la compleja dinámica de los sistemas sociales en los siguientes 50 años (Forrester, 1989).

La componente social en el contexto de la cuenca Lerma-Chapala se torna de importancia trascendental, al tener la población de la zona intereses encontrados en torno al agua. En primera instancia, esto se debe a su interdependencia en cuanto a los derechos de uso y distribución de aguas, su ordenamiento dentro de la cuenca, la intensa actividad económica y por último, el derecho consuetudinario* que rige desde que se instalaran las primeras poblaciones en la región y las leyes aplicables.

3.2 Metodología de aplicación sistémica

El análisis del sistema procede conforme a una secuencia probada, que consiste en la descripción del sistema, su historia, la búsqueda de la estructura subyacente en el sistema y su modelación cualitativa mediante un arquetipo sistémico.

Con base en la información histórica de la cuenca y bajo los principios de la dinámica de sistemas, se seguirá éste proceso para el desarrollo del arquetipo:

- a. Antecedentes del estudio o la historia.- Una breve narración, con un enfoque histórico de la problemática a modelar.
- b. Planteamiento de la problemática.- Observación de la historia y exposición de la problemática en busca del arquetipo de mejor aplicación.
- c. Análisis del sistema .- Reconocimiento de las variables e indicadores más relevantes que estructuran el sistema y su problemática.
- d. Propuesta del arquetipo de funcionamiento.- Se presenta y discute brevemente el arquetipo, incluidas las gráficas de su evolución en el tiempo.
- e. Pronóstico y soluciones.- Se evalúa lo que ocurrirá de prevalecer la situación modelada por el arquetipo, y se propone la solución de fondo a la problemática.

3.3 Antecedentes del estudio

El lago de Chapala, punto final de la cuenca del río Lerma, está situado al oeste de México, entre los 99°18' y 103°45' de longitud oeste y los 19°25' y 21°32' de latitud norte, se encuentra sobre una meseta a 1,500 m de altitud, próxima a la ciudad de Guadalajara, en el estado de Jalisco. Forma parte de la frontera entre los estados de Jalisco, que engloba tres

* Consuetudinario. Que se rige por la costumbre; aplícase especialmente al derecho no escrito

cuartas partes de la superficie del lago, y Michoacán. Es el lago más grande de México, a su máxima capacidad ocupa una superficie de 1,080 km², tiene unos 80 km de largo, unos 15 km de ancho y una profundidad media de 10 m. Actualmente, sin embargo, está reducido a poco más del 10% de su volumen.

Su principal aporte de agua procede del río Lerma, y desaguaba en el río Santiago, que a su vez desemboca en el océano Pacífico a través del río Grande o de Santiago, en el estado de Nayarit.

En la actualidad el lago afronta una fuerte disminución de niveles, debido a la sobreexplotación de sus aguas y las de la cuenca Lerma-Chapala de la que forma parte, además de períodos de secas, hasta el punto que se ha convertido en una cuenca cerrada, debido a que ya no ocurren salidas hacia el río Santiago.

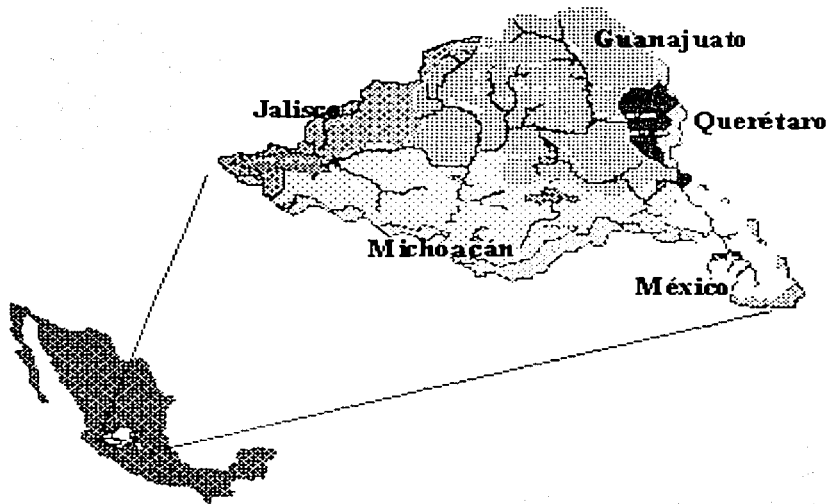


Figura 3.1 Ubicación geográfica del lago de Chapala

La cuenca ocupa alrededor de 48,215 km², lo que significa más o menos el 3% del territorio de México, sin considerar las cuencas cerradas de Pátzcuaro, Cuitzeo y Sayula, sin embargo concentra gran parte de la actividad económica del país, cubriendo parcialmente a 5 estados de la república: Guanajuato (49%), Jalisco (15%), Estado de México (11%), Michoacán (20%) y Querétaro (6%).

La precipitación media anual en la cuenca es muy variable. Aún cuando el valor promedio histórico es de 736 mm, según el Programa Hidráulico de Gran Visión de la Región, los registros generan una variación entre 460 a 1,070 mm, con un valor frecuente de 725 mm

anuales. Esta precipitación genera un volumen de escurrimiento superficial medio anual de 6,413 hm³, incluidos los volúmenes generados en las cuencas cerradas.

Existen fuertes variaciones temporales en los escurrimientos, con un mínimo de 190 hm³ en diciembre y un máximo de 810 hm³ en septiembre. La distribución espacial es prácticamente uniforme para toda la cuenca (IMTA, 2001).

Se reconocieron 40 acuíferos aproximadamente dentro de la cuenca, constituidos principalmente de materiales aluviales y vulcano clásticos, situados en profundas fosas estructurales de tipo tectónico. La recarga total media de estos acuíferos asciende a 4,010 hm³ anuales y la extracción media para los diversos usos asciende a 4,553 hm³.

La disponibilidad per cápita de agua de la cuenca es pobre. El promedio de agua disponible superficial y subterránea en México es de 4,977 m³ por habitante por año. En la cuenca Lerma-Chapala es menos de 1,000 m³, cifra que la ubica entre las cuencas hidrológicas con severa escasez de agua.

A más de la insuficiencia que se percibe, el agua está siendo contaminada, aumentando los problemas de disponibilidad. Adicionalmente, el manejo inadecuado de los otros recursos naturales que se asocian directamente al agua (suelo, vegetación, entre otros.), está dando origen a fenómenos de erosión y arrastre de suelos que contribuyen al azolve de cuerpos de agua.

3.4 Planteamiento del problema

3.4.1 Disponibilidad del recurso hídrico

En la cuenca se asentaba una población de 9.3 millones de habitantes según el censo de 1995 y según los resultados preliminares del XII Censo de Población y Vivienda en el 2000, se tendría una población de 10.7 millones de habitantes. Con una tasa de crecimiento urbano del 2% y de 1%, rural.

La mayor parte de estos pobladores se encuentra en el estado de Guanajuato (44%), seguido por Michoacán (23%), Estado de México (18%), Querétaro (10%) y finalmente Jalisco (5%).

Cuenca		Población urbana			Población rural		
Nº	Nombre	1990	1995	2000	1990	1995	2000
1	Álzate	769,766	1,135,311	1,307,919	399,579	272,038	313,090
2	Ramírez	32,484	132,993	147,016	271,785	216,676	244,242
3	Tepetitlán	0	3,620	3,734	21,705	21,183	21,834
4	Tepuxtepec	46,664	101,496	116,015	165,394	145,359	162,261
5	Solís	110,176	145,581	148,191	263,094	238,790	251,892
6	La Begoña	156,412	193,683	210,054	306,698	314,926	338,083
7	Ameche	474,362	640,027	733,853	221,179	190,775	215,577
8	Pericos	316,160	394,042	424,581	133,083	112,524	121,066

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

9	Yuriria	4,813	8,424	8,491	6,906	3,426	3,396
10	Salamanca	121,079	168,589	168,442	122,865	82,622	82,459
11	Adjuntas	859,986	1,064,554	1,162,328	143,715	126,147	138,727
12	Angulo	85,482	113,577	112,695	120,866	95,154	92,548
13	Corrales	679,666	858,485	898,846	622,258	548,162	563,939
14	Yurécuaro	100,053	124,320	120,561	84,332	67,955	65,549
15	Duero	226,569	294,840	295,936	123,539	87,658	86,856
16	Zula	81,951	96,036	102,109	39,083	36,838	38,153
17	Chapala	292,620	391,018	402,813	228,784	170,461	175,470
18	Pátzcuaro	70,534	115,571	117,754	142,946	111,909	112,209
19	Cuitzeo	581,222	728,339	769,690	268,575	206,688	208,958
20	Sayula	143,784	188,299	194,079	74,108	51,005	51,718
TOTAL LERMA		5,153,783	6,898,804	7,445,108	3,760,493	3,100,296	3,288,027

Tabla 3.1 Población urbana y rural en la cuenca Lerma Chapala, 1990 – 2000. Fuente: XI Censo de población y vivienda, 1990, conteo de población y vivienda, 1995, resultados preliminares del XII censo de población y vivienda, 2000

La cuenca Lerma-Chapala ha sido dividida en tres subregiones de planeación de zonas: Bajo Lerma, Medio Lerma y Alto Lerma; estas subregiones, a su vez, se descomponen en 20 subcuencas que incluyen tres subcuencas cerradas, que normalmente, no contribuyen al escurrimiento superficial del cauce principal (CNA, Gerencia Regional Lerma-Santiago-Pacífico).

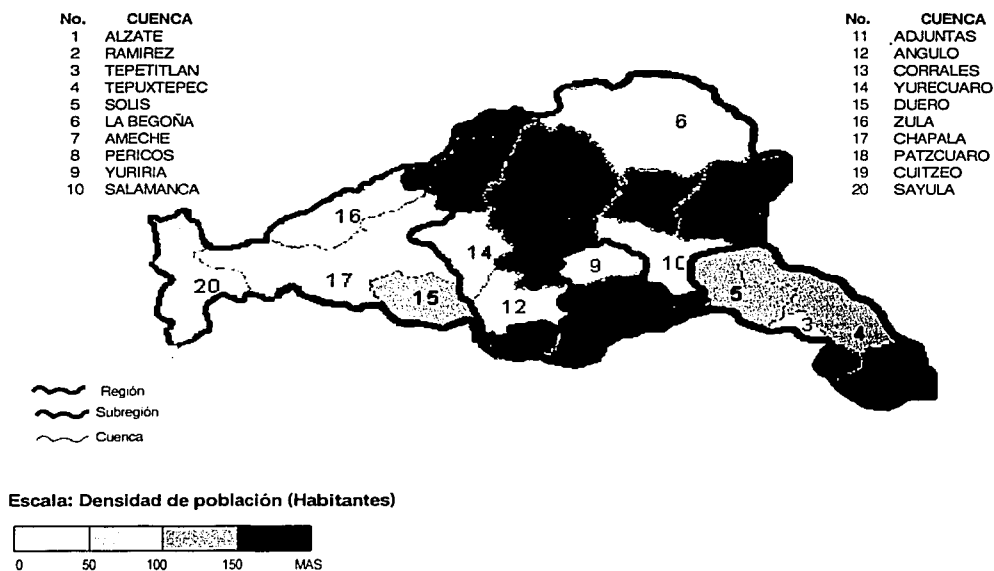


Figura 3.2 Densidad de población en la región Lerma, 2000. Fuente: IMTA, 2001

Subregión	Población total	Superficie (km ²)	Densidad Regional (hab/km ²)
Alto Lerma	3,924.905	13,781	284.8
Medio Lerma	5,461.194	30,541	178.8
Bajo Lerma	1,347.135	14,403	93.5
Total Lerma	10,733.135	58,725	182.8

Tabla 3.2 Densidad poblacional en la región Lerma, 2000. Fuente: Resultados preliminares del XII CENSO de población y vivienda, 2000; Gerencia de la Región Lerma Santiago

Como se observa en los cuadros comparativos siguientes, la disponibilidad de agua, tanto superficial como subterránea está subiendo aunque en pequeña medida, mientras que la disponibilidad por persona va en descenso debido al aumento poblacional.

	Disponibilidad de agua en hm ³			
	1990	1998	2000	2025
Habitantes	8800000	-	9920000	14740000
Disponibilidad (hm ³)	9222	-	9742	9728
Disponibilidad per capita (m ³ /hab/año)	1047	-	980	660
Disponibilidad superficial (hm ³ /año)	5192	5732	-	-

Tabla 3.3 Cuadro comparativo de disponibilidad de agua en la cuenca Lerma-Chapala

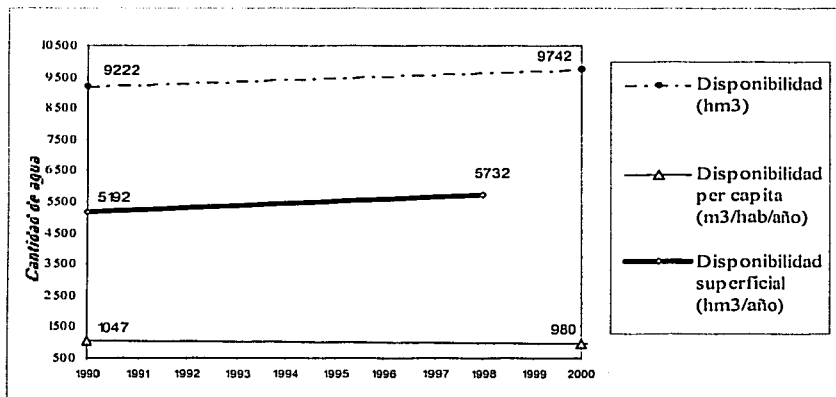


Figura 3.3 Disponibilidad de agua en la cuenca Lerma-Chapala

Es valioso analizar la evolución de las variables de control a través del tiempo, pues desde el punto de vista de la estructura, los patrones cualitativos son aún más importantes que la precisión.

De los 1,500 hm³ que entran al lago, se requieren 1,440 para satisfacer su evaporación natural, 240 para la demanda de agua de la ciudad de Guadalajara y 90 para riego agrícola.

Valores Históricos	1990
Extracciones (hm ³ /año)	3856
Balance superficial (hm ³ /año)	1336
Ingreso promedio anual (hm ³)	1500
Evaporación (hm ³ /año)	1440
Déficit (hm ³)	-275 ¹

¹ Caudales negativos representan déficit de agua.

Tabla 3.4 Balance de agua en el año 1990 en la cuenca Lerma-Chapala

Lo anterior se traduce en un déficit anual medio de 275 hm³, que aunado a un período de baja precipitación en la última década, la más crítica desde 1930, ha provocado un descenso en los niveles del lago.

Cabe señalar que los 1,500 hm³ que se señalan como entradas al lago, corresponden al promedio del período 1945 a 1989.

Por otro lado se tiene un inventario en la cuenca Lerma-Chapala, de alrededor de 1,567 obras, con una capacidad de 5,742 hm³, excluyendo al lago de Chapala, siendo las más grandes la presa Solís y la laguna de Yuriria. De estas obras se destacan 16 presas de almacenamiento y 35 de derivación, utilizadas para abastecer de agua a las zonas de riego.

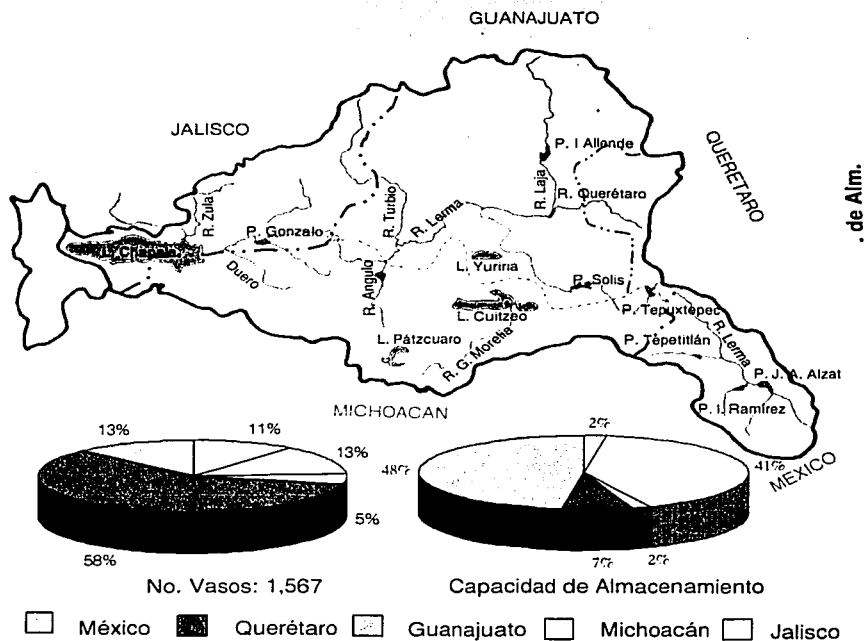


Figura 3.4 Inventario de almacenamientos en la cuenca Lerma-Chapala. Fuente: IMTA, 2001

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el Alto Lerma se destacan cinco presas de almacenamiento: Alzate, I. Ramírez, Tepetitlán, Tepuxtepec y Solís. El almacenamiento promedio anual de las cinco equivale al 51% de su capacidad total de conservación (1,350.9 hm³). Las salidas promedio anuales de las cinco ascienden a 1,068 hm³, de esta cantidad el 50% se emplea para la generación de energía eléctrica en la presa Tepuxtepec; volúmenes que después son aprovechados en la zona de riego de Maravatío o llegan a la presa Solís para el riego del distrito 011.

En el Medio Lerma destacan las presas almacenadoras: I. Allende, M. Ocampo, Peñuelitas, Purísima y la Laguna de Yuriria. Su almacenamiento promedio anual es del orden de 396 hm³, que representa el 60% de la capacidad total de conservación de las presas (669 hm³). Las salidas promedio anuales ascienden a 486 hm³, de los cuales el 87% se realiza en los meses de noviembre a junio. Esto indica que el uso principal de agua en esta subregión es el riego agrícola, a diferencia de las otras regiones donde las salidas tienden a distribuirse mejor durante los 12 meses del año, debido a que importantes volúmenes son dedicados a la generación de energía o al abastecimiento de agua potable.

En el caso del Bajo Lerma destacan las presas, incluyendo el lago de Chapala, Tule, Guaracha, Jaripo y Urcpetiro. El almacenamiento promedio anual es de 3,947 hm³, de los cuales 3,900 hm³ corresponden al almacenamiento promedio del lago de Chapala. El mes con almacenamiento más bajo es julio, cuando éste es de 3,358 hm³, y el mayor es noviembre, con 4,518 hm³. Debido a las características del lago, la evaporación asciende a 1,440 hm³ anuales en promedio, lo que representa el 98% de la evaporación anual promedio de los cinco embalses de la subregión. El mayor valor mensual se presenta en mayo y el menor en diciembre.

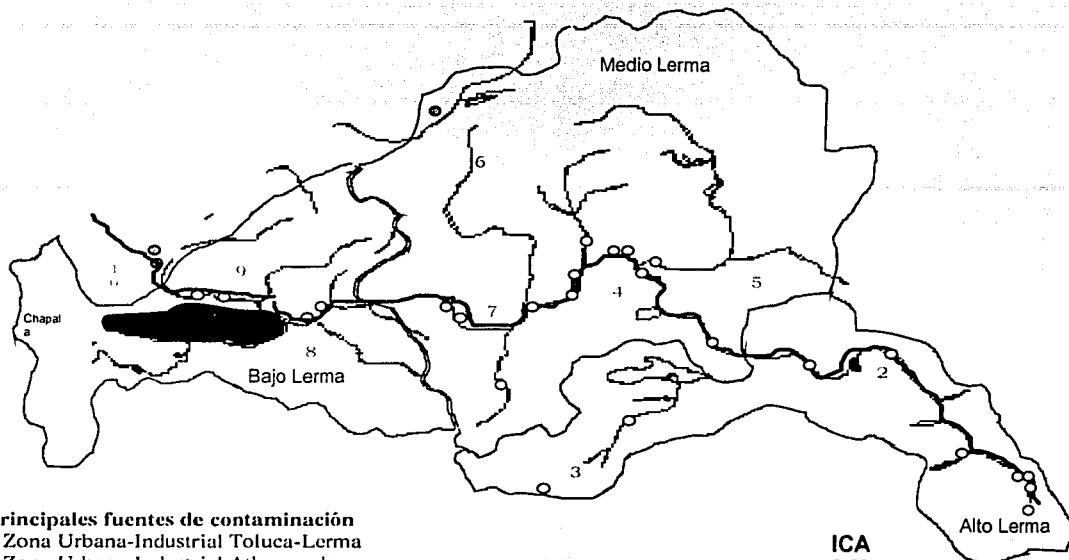
Hasta 1986 existían salidas del lago hacia el río Santiago para la generación de energía en una serie de plantas ubicadas a lo largo del cauce del río a partir del Salto. Las extracciones promedio anuales del lago fueron de 597 hm³.

Debido a los abatimientos en los niveles del lago y la necesidad de preservar los volúmenes para abastecimiento de agua a la zona metropolitana de Guadalajara, se suspendieron las plantas mencionadas, de tal manera que de 1986 a 1992 el promedio de extracciones del lago descendió a 264 hm³. Las otras cuatro presas presentan extracciones promedio anuales del orden de 35 hm³ (IMTA, 2001).

3.4.2 Calidad del agua

El desarrollo de las actividades productivas en la cuenca ha generado anualmente, alrededor de 400 hm³ de aguas residuales, con una carga contaminante del orden de 169,000 toneladas de DBO por año, lo que ha propiciado un estado de grave contaminación.

En la cuenca se cuenta con una red de monitoreo de la calidad del agua, que incluye 22 estaciones en el cauce del río Lerma y sus afluentes, 28 estaciones en el lago de Chapala y 2 laboratorios, uno en Guadalajara y otro en Celaya. La red de monitoreo no dispone de registros de rutina para los metales pesados, hidrocarburos y plaguicidas, requeridos para la evaluación de riesgos a la salud derivados de la posible interacción tóxica agua-sedimento.



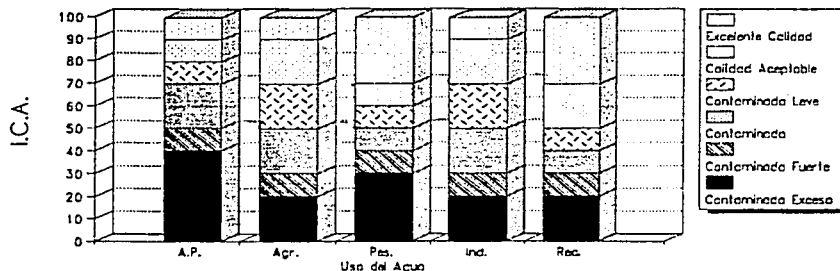
Principales fuentes de contaminación

- 1 Zona Urbana-Industrial Toluca-Lerma
- 2 Zona Urbana-Industrial Atlacomulco
- 3 Zona Urbana-Industrial Morelia
- 4 Zona Urbana-Industrial Celaya- Salamanca-Irapuato Gto
- 5 Zona Urbana Industrial Querétaro, Qro
- 6 Zona Urbana-Industrial León, Gto
- 7 Zona Agro-Industrial Abasolo, Pénjamo La Piedad
- 8 Zona Urbana-Agroindustrial de Zamora, Michoacán
- 9 Zona Industrial El Salto
- 10 Zona Urbana-Industrial Guadalajara

	ICA
Muy Contaminada	● 0-39
Contaminada	○ 40-69
Buena Calidad	● 70-100

Figura 3.5 Calidad del agua en la región Lerma-Santiago según el parámetro ICA. Fuente: Informe de calidad del agua 1974-1995, Gerencia de saneamiento y calidad del agua, CNA 1996

Escala de los I.C.A.
Como función del uso del agua



A.P. Agua Potable, Agr. Agricultura, Pes. Pesca y vida acuática, Ind. Industrial, Rec. Recreación.
Figura 3.6 Rangos de calificación del ICA según uso del agua

TEMA CON
FALLA DE ORIGEN

El índice de calidad (ICA) es una forma simplificada de ponderación de algunos parámetros que indican la calidad del agua. Algunos de los parámetros involucrados son: oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), pH, sólidos suspendidos totales (SST), coliformes totales y fecales, nitratos NO_3 , amonios NH_3 , fosfatos PO_4 , fenoles y la diferencia de temperatura ΔT . Fuente: Instituto de Ingeniería (1974).

La distribución de estaciones en la cuenca Lerma-Chapala es como sigue:

Subregión	Cantidad de estaciones registradoras	Período registrado
Alto Lerma	9	75-95
Medio Lerma	12	75-95
Bajo Lerma	5	75-94
Lago de Chapala	25	74-95

Tabla 3.5 Cantidad de estaciones en la cuenca Lerma-Chapala. Fuente: CNA 1996

3.4.3 Distribución del recurso según usos.

Los usos de agua que se dan en la cuenca Lerma-Chapala son los siguientes:

Uso agrícola. Esta actividad aprovecha cerca del 79% de las aguas superficiales y subterráneas. Las demandas del sector ascienden a un volumen estimado de 6,584 hm^3 (CNA, 1998), de las cuales el 52% corresponden a aguas superficiales y el resto a aguas subterráneas. Las 838,000 hectáreas bajo riego en la Cuenca ocupan el 15.5% de la superficie total. Se estima que las áreas de agricultura de temporal ocupan el 8.2%, con aproximadamente 445,000 hectáreas.

Actualmente las extracciones de agua para riego en la cuenca ascienden en promedio a los 6,412 hm^3 anuales, incluidas las que se realizan en el Lago de Chapala. El 50.8% de este volumen corresponde a aguas superficiales y el otro 50.2%, equivalente a los 3,223 hm^3 a aguas subterráneas. Las mayores extracciones para este uso se realizan en los estados de Guanajuato y Michoacán, con más del 90% de la extracción media anual total de aguas superficiales y el 83% de la extracción media anual de aguas subterráneas (IMTA, 2001).

Uso público urbano. En el abastecimiento a las poblaciones de la cuenca el 93% del agua es de origen subterráneo; el resto se atiende con fuentes superficiales. El total de agua usada en el sector es de 807 hm^3 , incluyendo 16 hm^3 entregados por el sistema Cutzamala en el acuífero de Toluca. El nivel de servicio de agua potable es de 85%. Adicionalmente existen dos importantes exportaciones de agua a poblaciones fuera de la cuenca: 237 hm^3 anuales se extraen del lago de Chapala para abastecimiento de la zona metropolitana de Guadalajara y 323 hm^3 del acuífero de Lerma, se envían anualmente para el abastecimiento del área metropolitana de la Ciudad de México.

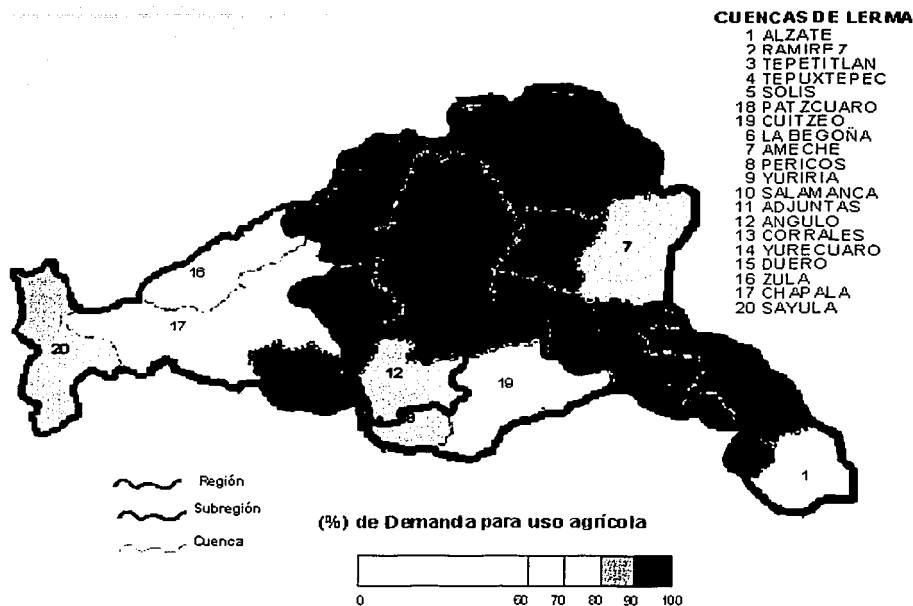


Figura 3.7 Demanda de agua superficial para uso agrícola, doméstico, pecuario e industrial en la región Lerma, 2000 Fuente: IMTA, 2001

Subregión	Vol (hm ³)	Agrícola	Doméstico	Pecuario	Industrial
Alto Lerma	827	631	156	25	15
Medio Lerma	1,662	1,550	17	60	35
Bajo Lerma	1,077	1,008	33	35	1
Total Lerma	3,566	3,189	206	120	51

Tabla 3.6 Distribución de la demanda consuntiva. Fuente: CNA, Gerencia Regional Lerma Santiago Pacifico

Uso industrial. La satisfacción de las demandas del agua para la industria depende en un 86% de las aguas subterráneas y el resto de fuentes superficiales. Su demanda se estima en 278 hm³ al año. Las principales ramas son la alimenticia, química, farmacéutica, metalmeccánica y petroquímica.

Otros usos. El resto de los usos comprende la generación de energía eléctrica, los servicios, pecuario y acuícola. La demanda total se calcula en poco más de 154 hm³ de usos consuntivos y en 600 hm³ en usos no consuntivos, principalmente generación de energía eléctrica.

En la tabla 3.5 se muestra que la extracción para los diferentes usos no ha variado significativamente, mientras que el balance final resulta con déficit considerable.

Registros en acuíferos	1990	2000
Acuíferos Recarga (hm ³ /año)	4030	3854
Acuíferos Extracción (hm ³ /año)	4010	4457
Número de Acuíferos sobre explotados	19	23
Disponibilidad en el acuífero (hm ³ /año)	20	-603

Tabla 3.7 Balance de agua comparativo 1990-2000 en la cuenca Lerma-Chapala

Extracciones por usuario	1990	2000
Extracción para uso urbano (hm ³)	1101	1070
Extracción para uso agrícola y pecuario (hm ³)	6572	6742
Extracción para industrial (hm ³)	295	276

Tabla 3.8 Usos de agua en la cuenca Lerma-Chapala

Dado que la recarga natural de los acuíferos en la cuenca se estima en 3,854 hm³ por año y existe una extracción de 4,457 hm³, existe un déficit global del orden de 603 hm³ por año. Además, tras esta cifra global se esconden graves problemas locales y regionales de sobreexplotación de acuíferos, incluso se identifican zonas severamente sobreexplotadas en las que las extracciones se calculan en cuatro veces la recarga media anual.

3.5 Análisis del sistema

La tendencia del comportamiento del sistema y su evolución en el tiempo se puede desprender del análisis de las estructuras genéricas con ciclos de retroalimentación conocidos como arquetipos sistémicos. Estos modelos genéricos ampliamente estudiados, proveen de señales inmediatas sobre potenciales patologías del sistema y formas iniciales de corregirlas (Ritchie-Dunham, 2001).

Un arquetipo muy difundido desde su aparición es el de la "Tragedia de los Comunes". Garret Hardin en 1968, en su clásico libro *The tragedy of the commons* (la tragedia de los comunes), define un *commons* como un recurso cualquiera que es compartido por un grupo de personas, es decir, es de uso común. La tragedia ocurre como resultado de que cada cual tiene la libertad de explotar los recursos comunes sin control y no percibe los beneficios de controlar el uso del recurso. Como consecuencia se produce la dinámica del "colapso" por la destrucción o degradación de la capacidad de regeneración del recurso común.

Claramente se evidencia la presencia de esta estructura en la dinámica de la cuenca Lerma-Chapala. La característica principal es la presencia de varios actores: usuarios de agua (agricultores, industriales, comerciales, domésticos, pecuarios, etc.), que explotan el recurso hídrico limitado, pensando sólo en la necesidad individual de su actividad.

El comportamiento del lago de Chapala está asociado a un éxito inicial, relacionado con la mejora de la calidad de vida de los pobladores dentro los cinco estados y de los más de 10.7 millones que dependen de la cuenca, aparte de los beneficios económicos generados por la producción industrial, pecuaria y principalmente agrícola.

La competencia por el recurso en la cuenca Lerma-Chapala provoca severos conflictos entre usuarios, mientras los niveles de contaminación limitan la posibilidad de aprovechar mejor el agua en otros usos productivos. Los ciclos de retroalimentación de cada tipo de usuario se refuerzan respectivamente de la siguiente manera:

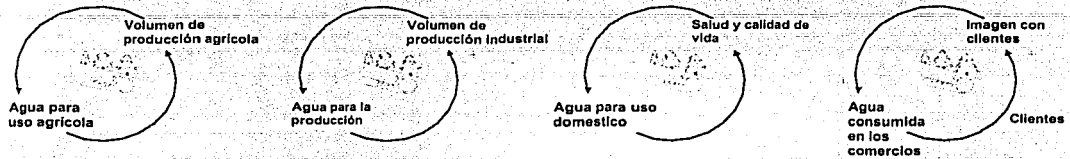


Figura 3.8 Ciclos reforzadores de los actores del sistema

Al estar presentes estos ciclos reforzadores presionando el sistema en la explotación del agua y al haber actuado durante un tiempo prolongado, el recurso empieza a ser insuficiente para todos, los usuarios intensifican sus esfuerzos por aprovechar el agua y eventualmente acaban con el recurso, a medida que los beneficios individuales se ven disminuidos. Este resultado se puede prever para el lago de Chapala en un plazo próximo, si no se aplican soluciones de manejo de cuenca adecuadas.

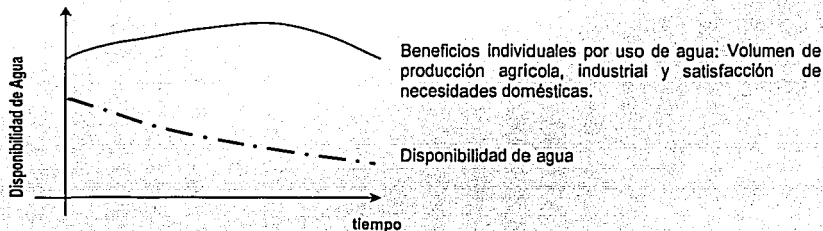


Figura 3.9 Tendencia de la disponibilidad y los beneficios típicos en una estructura "tragedia de los comunes"

La esencia de la tragedia en el uso de los *commons*, reside en la despreocupación por el bien público, hasta que los niveles de escasez son notorios.

En la actualidad los recursos hidráulicos de la cuenca se encuentran en el límite de su aprovechamiento. De continuar con la extracción de más agua en la cuenca, se afectará necesariamente a los usuarios ubicados aguas abajo o a los que comparten los recursos renovables de los acuíferos. Esto pone en riesgo el desarrollo alcanzado en la región y la conservación del lago de Chapala, tanto en cantidad como en calidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La tendencia simplificada de los niveles del lago sería al descenso:

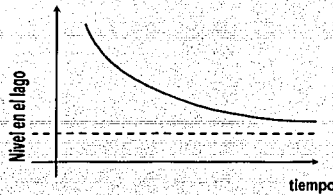


Figura 3.10 Comportamiento simplificado en el tiempo de los niveles del lago

Los registros medidos de las elevaciones del lago muestran una marcada tendencia al descenso en la última de década (1990-2000).

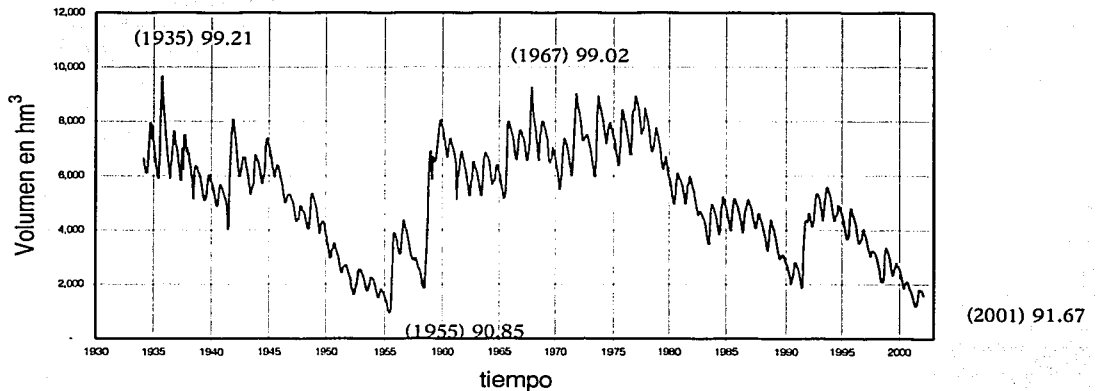


Figura 3.11 Registro de niveles de la superficie libre en el lago de Chapala 1934-2001

Entretanto, la orientación del grado de explotación del recurso presenta un aumento a una tasa de crecimiento superior a la capacidad de renovación del mismo.

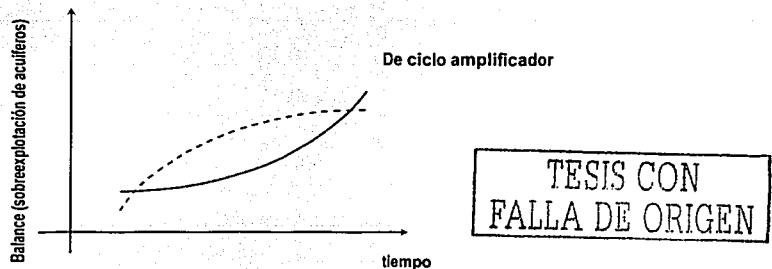


Figura 3.12 Evolución factible de extracciones subterráneas

Según Senge (1990), cuando el recurso común esta involucrado en situaciones ecológicas, el acceso al mismo debe ser clausurado hasta que tenga tiempo de recobrase. Esta recomendación es impracticable tratándose de un recurso vital como lo es el agua, pero se pueden plantear otras opciones menos drásticas a través el manejo integral del recurso.

A continuación se muestra la estructura que determina este comportamiento en la cuenca:

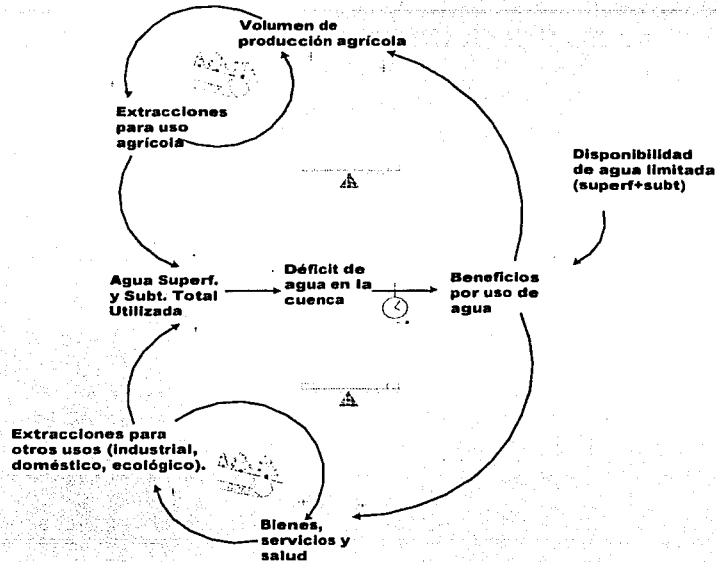


Figura 3.13 Arquetipo sistémico de competencia por el recurso hídrico

A raíz de una posible catástrofe venidera frente al uso indiscriminado de algunos recursos de uso común, Ostrom (2000) después de un prolífico análisis de muchas instituciones de autogestión colectiva en diversos países, propone el Gobierno de los bienes comunes (*Governing the Commons*) sin consumirlos en exceso y controlando al mismo tiempo los costos de administración. Dos características generales comunes en este tipo de instituciones son:

1. Los apropiadores del recurso han creado, aplicado y supervisado sus propias reglas es decir, han generado su autogestión.
2. El sistema de recursos e instituciones ha perdurado por largos períodos.

Un avance en materia de autogestión del recurso hídrico en la Cuenca Lerma - Chapala, se dio en 1993 al constituirse el primer Consejo de Cuenca en México. Mismo que aplica el Acuerdo de distribución de aguas superficiales entre usuarios de la cuenca, así como el saneamiento de aguas residuales municipales de la región Lerma y del lago de Chapala.

cuenca se muestra en la figura 3.14). Esto refuerza el problema fundamental y reduce la eficacia de las acciones correctivas de fondo.

Los niveles del lago quedan determinados básicamente por la cantidad de lluvias registradas, sin embargo una adecuada gestión integral del recurso hídrico contribuye a mantener los niveles del lago por encima del nivel crítico admisible (2,000 hm³ según el Acuerdo de 1991) o eventualmente evitar su desecación.

Una gestión integral del agua en la cuenca, basada en los principios rectores mencionados en el capítulo 1, debe ser un proceso que promueva el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, maximizando el bienestar social y económico sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.

Para lograr esta gestión global del recurso hídrico en la cuenca Lerma-Chapala como solución fundamental en el comportamiento arquetípico de desplazamiento de carga observado en la figura 3.15, se sugieren las siguientes recomendaciones:

1. Administrar el recurso hídrico de manera holística considerando todas las fuentes de disponibilidad de aguas en la cuenca: aguas superficiales y subterráneas.
2. Observar la calidad de las aguas servidas en la cuenca. Anualmente se generan alrededor de 400 hm³ de aguas residuales con una carga contaminante del orden de 169,000 ton de DBO por año. Debe realizarse una lucha efectiva contra la contaminación, propiciando la construcción de plantas de tratamiento. Así mismo aplicar el principio "usuario contaminador-pagador".
3. Controlar la explotación de acuíferos, especialmente en las subregiones Alto Lerma, en los acuíferos del Valle de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca y en la subregion Medio Lerma, en los acuíferos del Valle de Querétaro de Celaya y de Leon, así como en el Río Turbio y Pénjamo-Abasolo. La sobreexplotación de acuíferos llega a afectar la disponibilidad de aguas superficiales sobre todo en los periodos de estiaje al disminuir el flujo base.
4. Promover el uso eficiente del agua y el reúso. Mejorar la eficiencia estimada en el sector agrícola en un 39% de riego promedio anual para los distritos de riego y en un 56% para las unidades de riego. Mientras que en las zonas urbanas se observan elevados porcentajes de fugas y tomas clandestinas que deben ser vigilados.

Al enfocarse en la distribución de agua superficial y no en la disponibilidad global de agua en la cuenca, inadvertidamente, se provocó que el manejo de la demanda se hiciera más difícil de efectuar, ya que los usuarios adquirieron hábitos de consumo mayores y más dificultosos de satisfacer.

Si bien es cierto las soluciones fundamentales planteadas sólo pueden ser alcanzadas a largo plazo y con los recursos suficientes, la solución sintomática de distribución de aguas serviría para ganar tiempo para ir hacia la dirección deseada.

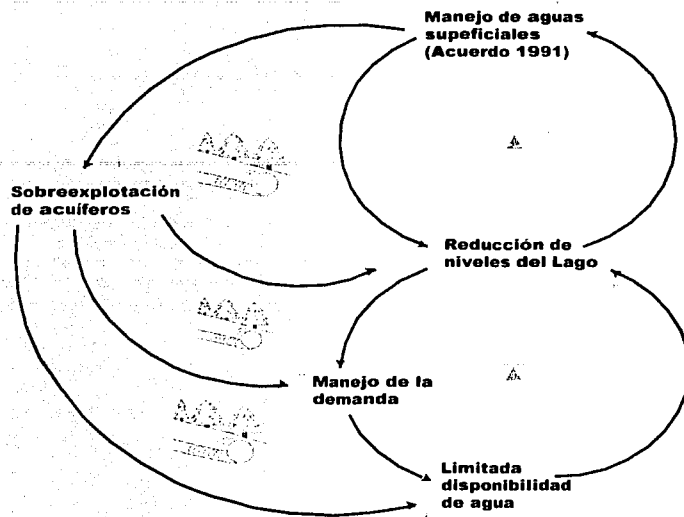


Figura 3.15 Arquetipo sistémico de desplazamiento de carga en el lago de Chapala

Otro problema real en la cuenca, es el deterioro de la calidad de aguas disponibles. El diagrama causal de la figura 3.16, muestra el comportamiento de la cuenca que lleva a este deterioro ambiental.

El deterioro de la calidad de agua del lago de Chapala es uno de los problemas más graves en la cuenca. Las descargas municipales y los escurrimientos agrícolas generados en los diferentes usos del agua, traen un carga contaminante consistente en diversas sustancias orgánicas, las más perjudiciales son los nitratos y los fosfatos.

Las concentraciones de fosfatos presentan una tendencia a aumentar, alcanzando valores de 0.8 mg/l, los cuales superan la norma para agua potable de 0.3 mg/l; aunque a partir de 1985 la concentración de fosfato ha tendido a disminuir. Dado que el volumen en el lago a partir de esa fecha también ha disminuido, la reducción en la concentración de fosfatos se explica por una reducción en la carga contaminante y por un incremento en el consumo del fosfato en forma de nutriente.

Por otro lado, al ser el lago de Chapala un lago somero, es decir de poca profundidad, tiene una zona fótica reducida debido a la resuspensión de sedimentos que inhibe la penetración de luz solar. Esto limita drásticamente la producción de fitoplancton, hasta hacerlo insuficiente para mantener el sistema trófico en el interior del mismo. Pero este potencial alimento proveniente de la carga contaminante, da lugar a la proliferación del lirio acuático en la superficie del lago.

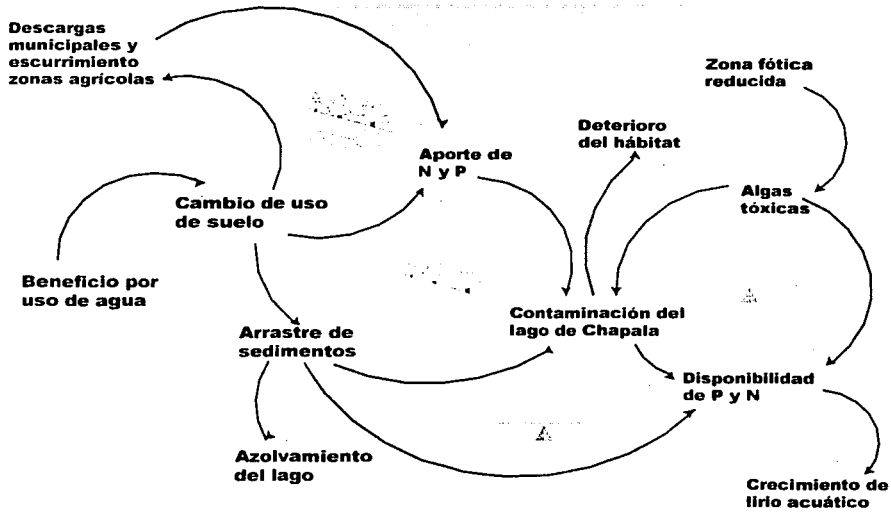


Figura 3.16 Arquetipo sistémico característico de lagos someros para el lago de Chapala

Por otro lado, estudios recientes demuestran que el sedimento, cargado de altos contenidos de bacterias, es el sustrato alimenticio principal de algunas especies de peces, que han permitido inclusive la pesca comercial en el lago, aunque no se ha precisado la interacción de los metales pesados con el sedimento y el ser humano.

La mayoría de las descargas en el lago ingresan sin ningún tratamiento, sólo un pequeño porcentaje es tratado, agravando los problemas de disponibilidad.

Registros aguas Servidas	1993	2000
Descargas municipales (m ³ /s)	10.54	15.846
Caudal tratado (m ³ /s)	1.85	3.015

Tabla 3.9 Descargas de agua en la cuenca Lerma-Chapala

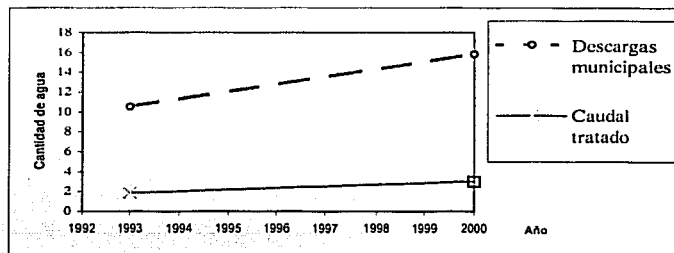


Figura 3.17 Comparación entre descargas municipales y caudal tratado en la cuenca Lerma-Chapala

3.6 Diagrama causal del lago de Chapala

Las interrelaciones entre las estructuras prototípicas detalladas en el ítem 3.5 en la dinámica de la cuenca Lerma-Chapala, generan la estructura causal de su comportamiento (figura 3.18).

El diagrama está compuesto de tres partes principales que fueron detalladas respectivamente como arquetipos: de tragedia de los comunes, de desplazamiento de carga y de calidad de aguas en lagos someros como se detalló en la sección 3.5.

El vínculo entre el arquetipo de tragedia de los comunes (parte 2, figura 3.18) y el de desplazamiento de carga (parte 1, figura 3.18) se presenta entre las variables de control: *déficit de agua* en la cuenca y *niveles del lago*. Mientras que la variable *disponibilidad de agua restringida* ejerce influencia limitante sobre la variable *beneficios por uso de agua* en la cuenca.

Mientras que los arquetipos de tragedia de los comunes y de calidad de aguas en lagos someros se vinculan a través de las variables: *beneficios por uso del agua* y las *descargas municipales* (tratadas y sin tratar), así como los *escurrimientos agrícolas* que se generan.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

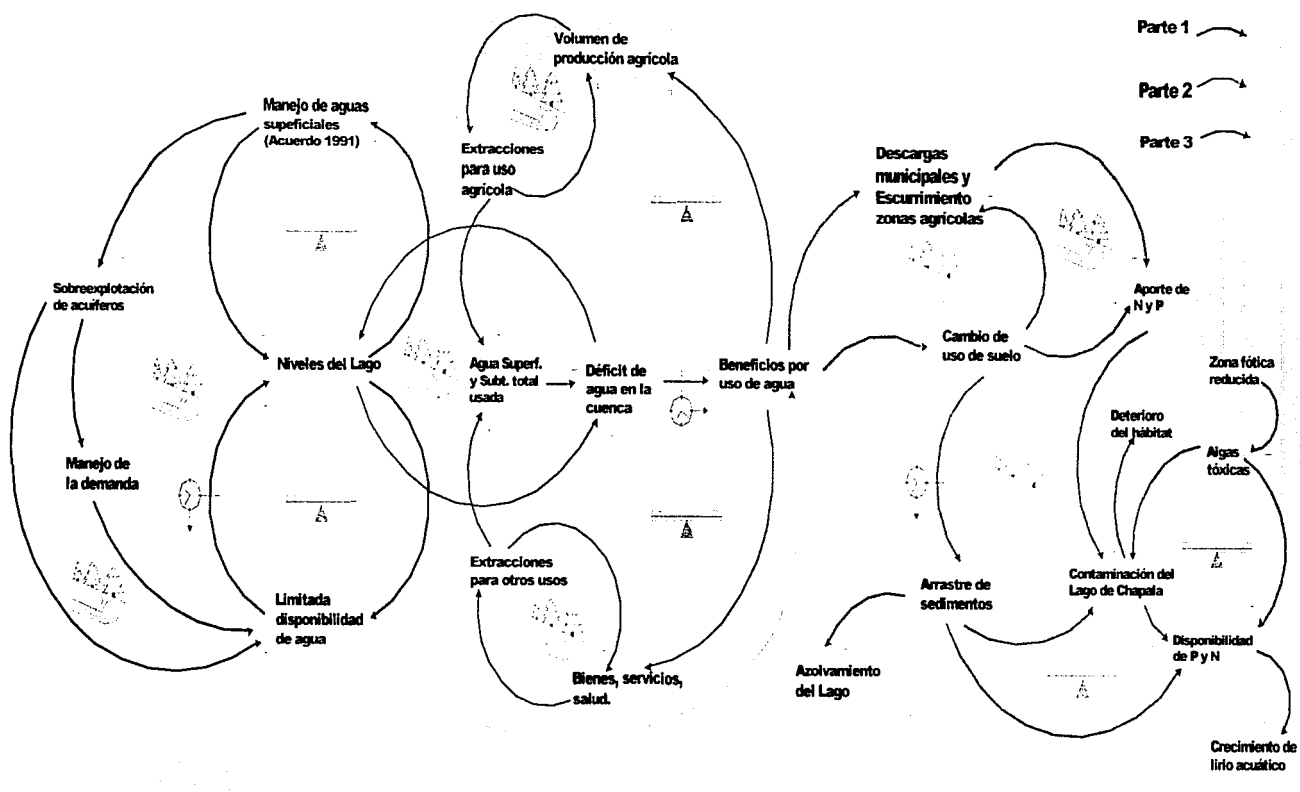


Figura 3.18 Diagrama causal del comportamiento del lago de Chapala

Capítulo 4

Modelación del arquetipo sistémico

4.1 Modelación del sistema

Ya se demostró que los patrones cualitativos que muestran las tendencias a través del tiempo, son importantes complementos a los valores numéricos; sin embargo, las estructuras sistémicas deben probar su capacidad de modelación del proceso real a través de su comprobación numérica.

Bajo el enfoque de sistemas se puede hacer la siguiente distinción. Por un lado, un sistema existe y opera en el tiempo y el espacio, mientras que un modelo es una representación simplificada de un sistema en un punto particular del tiempo y el espacio e intenta comprender al sistema en sí.

Por otro lado, una simulación vendría a ser la manipulación del modelo, de tal modo, que opere en el tiempo o el espacio permitiendo la percepción de las interacciones, que de otra forma no serían aparentes debido a su separación temporal o espacial.

La modelación y la simulación conforman una disciplina, que desarrolla un nivel de entendimiento de las interacciones entre las partes de un sistema y del sistema como un

todo. El nivel de entendimiento pudiera ser desarrollado por esta disciplina o por cualquier otra similar (Bellinger, 1999).

Ya que los modelos son únicamente simplificaciones de la realidad, existe una dependencia con el nivel de detalles considerado. Si el detalle es pequeño en el modelo, se corre el riesgo de perder interacciones relevantes y el modelo resultante, por ende, no facilita el entendimiento. Mientras que, si el nivel de detalle o de complejidad es grande, el modelo pudiera ser extremadamente complicado y finalmente limitar la comprensión de la realidad. Senge (1995) habla de dos tipos de complejidades: la de detalle y la dinámica. La complejidad de detalle está asociada con los sistemas que tienen muchos componentes, mientras que, la complejidad dinámica está relacionada con sistemas que tienen causa y efecto separados en el tiempo y el espacio. La comprensión de las complejidades dinámicas es más dificultosa, ya que no es posible ver las conexiones entre partes del sistema y sus interacciones.

4.1.1 Herramientas para la modelación del sistema

Los modelos cualitativos antes estudiados, están compuestos principalmente por sólo dos componentes: elementos e influencias. Una influencia tiene una dirección (\rightarrow) y un indicador que puede diferenciar si el elemento influenciado cambia en la misma dirección (+) ó en dirección opuesta (-) respecto al elemento influyente. Un elemento es cualquier variable que interviene en el sistema.



Figura 4.1 Componentes de modelos cualitativos

La figura 4.1 muestra, que E1 y E2 son elementos del modelo y que E1 ejerce influencia sobre E2 en la misma dirección que E1 (+) y no se observa ninguna influencia de E2 sobre E1.

La estrategia usualmente seguida para la formulación de un modelo, es empezar con un diagrama de ciclo causal, luego formular el diagrama *stock-flow* correspondiente, después escribir las ecuaciones, y finalmente usar las ecuaciones para simular, mediante un modelo en computadora, el comportamiento del sistema (Roberts, 2001).

El primer paso hacia la modelación de la problemática del lago de Chapala, en donde, se parte de la representación por ciclos causales (figura 3.16 Diagrama causal del lago de Chapala), será identificar acumuladores (*stocks or levels*) y flujos o tasas (*flows or rates*).

Las herramientas de modelación *stock-flow* están compuestas por cuatro componentes diferentes: acumuladores, flujos, convertidores y conectores. Un acumulador es una

cantidad que almacena en el tiempo, y un flujo es una actividad, movimiento, o tasa que contribuye al cambio por unidad de tiempo en un acumulador (Roberts, 2001).

Los convertidores sirven con roles más utilitarios, pueden asumir valores constantes, definir ingresos externos al modelo, calcular relaciones algebraicas y servir como variables para funciones gráficas. En general, convierten ingresos en salidas.

Por otro lado, los conectores, como sugiere su nombre, conectan elementos del modelo. El software *Stella Research*, que se usará como herramienta de modelación provee de 2 clases de conectores: de acción y de información. Los conectores de acción se representan por flechas sólidas mientras que los de información, por flechas discontinuas.

El reconocimiento de los diagramas *stock-flow* requiere de algunos símbolos adicionales. La figura 4.2 describe un diagrama causal y su correspondiente diagrama *stock-flow* de la interacción de la población respecto a los nacimientos. El acumulador en este caso particular es la población, indicada por el rectángulo y los nacimientos son el flujo, indicado por la válvula.

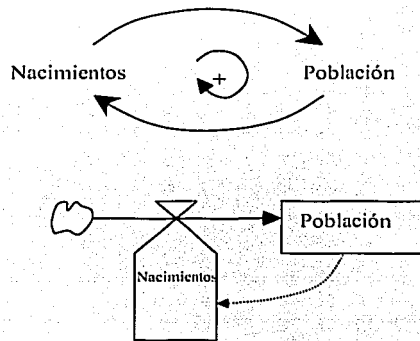


Figura 4.2 Diagrama causal y diagrama *stock-flow* del crecimiento poblacional

Existen algunas convenciones entre los cuatro componentes de los diagramas *stock-flow*:

1. Los flujos pueden influenciar a los acumuladores.
2. Los acumuladores pueden influenciar a los flujos y convertidores, pero no pueden influenciar a otros acumuladores.
3. Los flujos no pueden influenciar a los convertidores u otros flujos.
4. Los convertidores pueden influenciar a los flujos y otros convertidores, pero no pueden influenciar a los acumuladores.

Utilizar las herramientas de la modelación *stock-flow* conjuntamente, prueba tener beneficios en algunos aspectos:

1. Incremento en la precisión en la modelación de sistemas complejos.
2. Facilidad de compartir observaciones y experiencias.
3. Comprensión del comportamiento dinámico de los sistemas.

Los simuladores matemáticos basados en modelos *stock-flow*, que serán usados en la modelación del comportamiento del lago de Chapala, permiten probar:

1. La influencia entre variables cuantitativas y cualitativas, además los resultados previsibles de iniciativas de cambio de dichas variables.
2. El efecto que diferentes políticas operativas pueden tener a lo largo del tiempo.
3. Los efectos de estas políticas bajo distintas alternativas estratégicas futuras o escenarios.

4.1.2 Modelación de ciclos retroalimentadores

La simulación de las estructuras genéricas se ejecutarán utilizando el software *Stella Research 7.0.1 (Systems Thinking Educational Learning Laboratory with Animation)*, basada en los diagramas *stock-flow*.

A continuación se ejemplifican las herramientas y la metodología de la modelación.

Ciclo positivo o amplificador. Estos círculos llevan al crecimiento o al cambio. Un ejemplo sería la reproducción de la bacteria *E.Coli* en un frasco de cultivo. La tasa de reproducción crece en función al número de bacterias *E.Coli*, cuanto más alta es la tasa de reproducción, más cantidad de bacterias hay en el recipiente. Entonces lo que determina directamente la tasa de reproducción de las bacterias *E.Coli*, es el número existente de bacterias en el frasco.

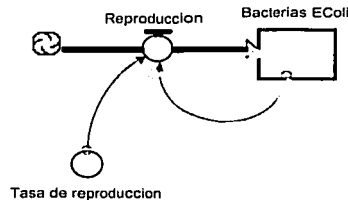


Figura 4.3 Diagrama Stock-Flow del crecimiento bacteriano de *E.Coli*. Fuente: System Dynamics Group (1994), *Road Maps*

Donde:

- Es el acumulador, para el ejemplo la cantidad de bacterias *E.Coli*.
- ⊖ Es el flujo representado por una válvula con la variable reproducción.
- Es el convertidor que actúa como razón de cambio del flujo de reproducción.
- ⊕ Es el extremo de una flecha sólida que representa el “recurso”, en este caso a las bacterias. Los “recursos” representan sistemas de acumuladores y flujos fuera de los límites del modelo.

El flujo de reproducción de bacterias por hora en el acumulador es el *vínculo material*. Mientras que las flechas sombreadas representan *vínculos causales*. El conector que amarra la tasa de reproducción con el número actual de bacterias, se denomina *vínculo informativo*, porque lleva la información sobre el estado actual del sistema (el valor del acumulador) a los mecanismos que manejan el sistema hacia el cambio (el flujo).

Los vínculos materiales e informativos ayudan a determinar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo. Las flechas sombreadas por otro lado no direccionan el sistema sino que simplemente describen el flujo de causalidad.

Al asumir por ejemplo un valor inicial de 100 bacterias y que toma un tiempo aproximado de media hora para que la población se duplique, ¿Cuántas bacterias encontrará el asistente de investigación al cabo de cuatro horas?

La figura adjunta muestra el comportamiento de la bacteria *E.Coli* a lo largo del tiempo con un modelo corrido en el *Stella*. En cuatro horas la bacteria *E.Coli* crecerá de una población de 100 inicial a 25,600 bacterias, debido al crecimiento exponencial.

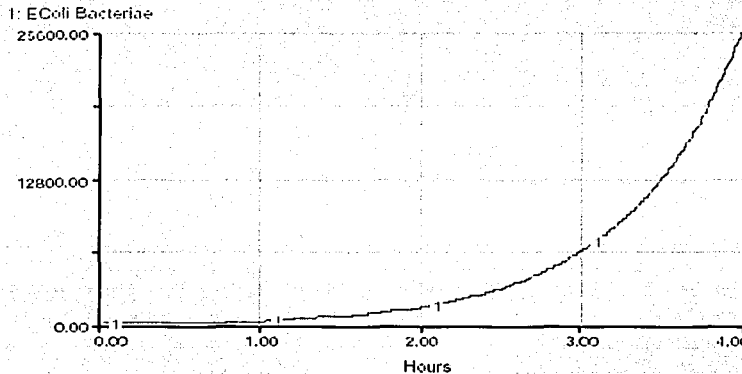


Figura 4.4 Evolución del crecimiento bacteriano de *E.Coli*

Ciclo negativo o estabilizador. Este tipo de círculo se niega al cambio y estabiliza el sistema. El crecimiento de una variable, eventualmente posibilita el decremento de la misma.

Un ejemplo de este tipo de ciclo puede ser el decaimiento gradual de los núcleos de alguna sustancia radiactiva. Radiactividad es la desintegración espontánea de núcleos atómicos mediante la emisión de partículas subatómicas llamadas partículas alfa y partículas beta, y de radiaciones electromagnéticas denominadas rayos X y rayos gamma. Cada año una fracción del número total de núcleos radioactivos decae.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

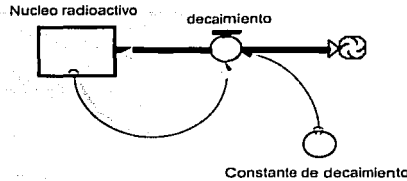


Figura 4.5 Diagrama stock-flow de decaimiento radioactivo

La razón o tasa de decaimiento* muestra la salida permanente de núcleos fuera del acumulador, físicamente corresponde a la cantidad de núcleos de una sustancia radioactiva que se desintegran por unidad de tiempo.

Al trazar el ciclo retroalimentador, se parte de un número elevado de núcleos radioactivos, por ende la tasa de decaimiento es también grande. El decaimiento reduce el número de núcleos. Luego, el acumulador tiene un número menor de núcleos sobrantes, pero el número es aún significativo. La tasa de decaimiento es todavía alta pero no tanto como al principio. La cantidad de núcleos del elemento radioactivo no disminuye drásticamente, pero sí rápidamente. A medida que transcurre el tiempo, el elemento radioactivo decae debido a que su número de núcleos original es cada vez menor y menor, por consiguiente, la tasa de decaimiento es también más y más pequeña, de esta manera el proceso de decaimiento se torna sucesivamente más lento.

Dado el carbono-14 con una vida media de 5230 años, ¿Cuál será el comportamiento de 1000 núcleos radioactivos de carbono-14 en un período de 300 siglos?

La figura muestra el comportamiento del carbono-14, denominado decaimiento exponencial o asintótico, modelado en la plataforma Stella.

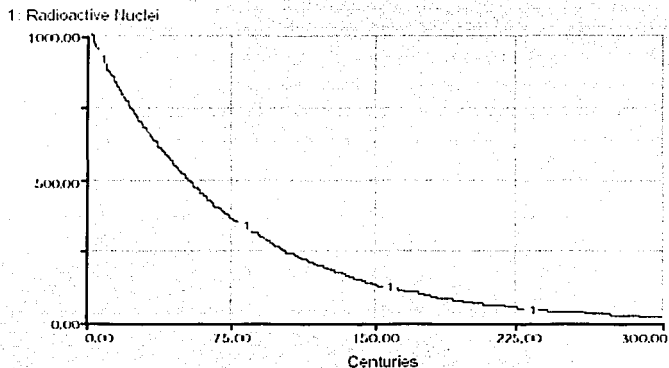


Figura 4.6 Comportamiento en el tiempo del decaimiento radioactivo

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

* La tasa de decaimiento o de crecimiento, en dinámica de sistemas, no se entiende en el estricto sentido de la palabra como porcentaje de la variable acumuladora por unidad de tiempo, sino la tasa representará el valor calculado respecto a la variable acumuladora en la unidad de tiempo en uso.

Los ciclos negativos en sistemas simples presentan un comportamiento asintótico hacia el objetivo, como en el caso del decaimiento radioactivo, cuyo objetivo era alcanzar el cero, es decir, hasta que no queden más núcleos. En sistemas complejos, el comportamiento puede ser oscilatorio hacia el objetivo.

Los dos tipos de ciclos, positivos y negativos se combinan para crear todos los comportamientos observados en sistemas complejos.

4.2 Ejemplos sencillos de modelación de arquetipos

4.2.1 Desplazamiento de carga

La estructura de “desplazamiento de carga” se caracteriza por dos ciclos balanceadores. Uno de estos ciclos brinda una mejor solución a largo plazo frente a la situación, y presenta una demora de tiempo asociada al mismo (ver Anexo A). El otro ciclo balanceador, es el más frecuentemente escogido, ya que presenta un resultado a corto plazo, pero en realidad no resuelve la dificultad fundamental, y el problema percibido retorna.

Se presenta un ejemplo aplicativo sencillo que simula una piscina inicialmente llena con 72 cm de altura, en la cual se busca alcanzar un nivel de 72 cm de agua permanentemente. La piscina tiene un fuga que disminuye el nivel en 0.25 cm/h. Así es que, se puede optar por añadir agua (solución sintomática) o arreglar la fuga (solución fundamental). Añadir agua es más sencillo, y toma mucho tiempo menos, pero asegura que se deberá añadir agua nuevamente en un futuro cercano.

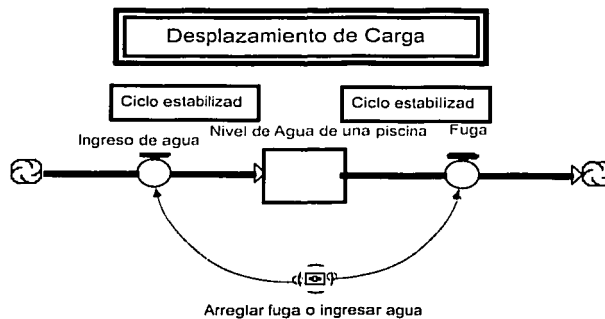


Figura 4.7 Modelo ejemplificado del arquetipo de desplazamiento de carga

Se tienen como condiciones iniciales: la piscina con 72 cm. de agua en ella, con una fuga que provoca una pérdida de agua a razón de 0.25 cm/h.

Condición inicial:

INIT Nivel_de_Agua_de_una_piscina = 72

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

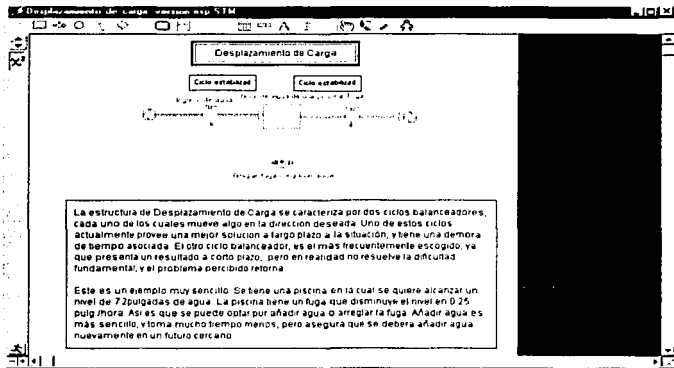


Figura 4.8 Captura del modelo en la plataforma Stella del ejemplo de fuga de agua

Se puede escoger entre añadir agua para brindar el nivel deseado o se puede arreglar la fuga. Estas posibilidades se dan moviendo el deslizador a la derecha para añadir agua a la piscina. El mover a -1 representa el arreglo de la fuga. Cualquier valor de arreglar fuga o añadir agua mayor que 0 representa la adición de agua. Cero es esencialmente la representación de no acción.

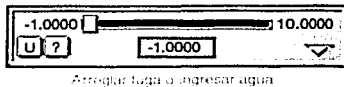


Figura 4.9 Deslizador utilizado por el tomador de decisiones

INFLOWS:

$Ingreso_de_agua = if\ Arreglar_fuga_o_ingresar_agua > 0\ then$
 $Arreglar_fuga_o_ingresar_agua\ else\ 0$

La ecuación ha sido confeccionada de tal manera que empeora progresivamente con el tiempo. De tal manera que después de 100 unidades de tiempo la fuga será de 10.25 cm/h.

OUTFLOWS:

$Fuga = (.25 + time/10.0) * (If\ Arreglar_fuga_o_ingresar_agua = -1\ then\ 0\ else\ 1)$
 $Arreglar_fuga_o_ingresar_agua = 0$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

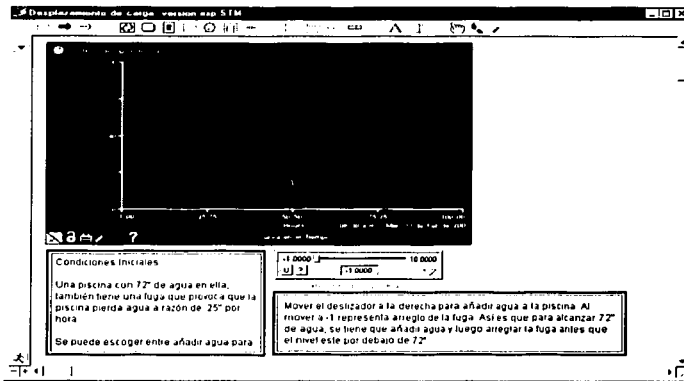


Figura 4.10 Comportamiento del nivel de la piscina ante la opción de añadir agua

El principio administrativo para alcanzar 72 cm. de agua en la piscina será añadir agua al principio y luego arreglar la fuga antes que el nivel esté por debajo de 72 cm.

$$\text{Nivel_de_Agua_de_una_piscina}(t) = \text{Nivel_de_Agua_de_una_piscina}(t - dt) + (\text{Ingreso_de_agua} - \text{Fuga}) * dt$$

4.2.2 Tragedia de los comunes

La estructura “tragedia de los comunes” está caracterizada por dos ciclos retroalimentadores que son compensados por dos ciclos estabilizadores.

En el ejemplo que se presenta, ambos actores *A* y *B* dentro del sistema dependen del mismo recurso común para obtener ganancias.

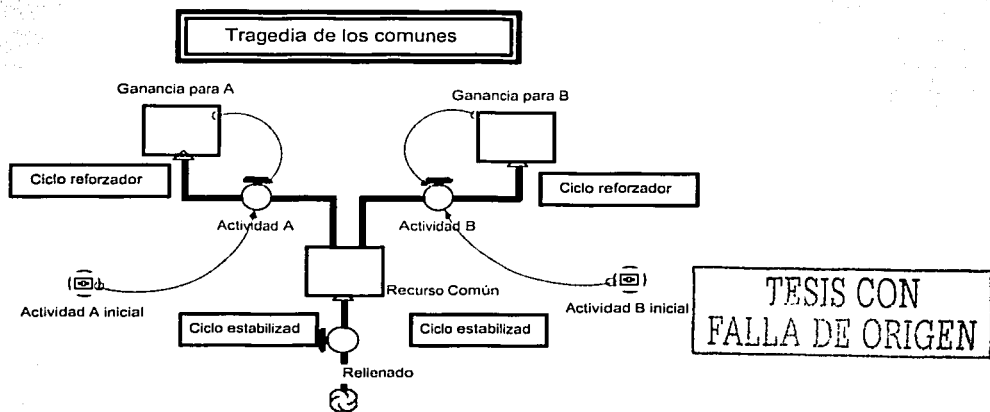


Figura 4.11 Modelo prototípico de la estructura tragedia de los comunes

A medida que cada uno gana, se incrementa el uso del recurso común, hasta tal punto que el uso del bien común excede la capacidad de renovación del mismo. Cuando esto ocurre, la ganancia de ambos: A y B es limitada.

$$\text{Ganancia_para_A}(t) = \text{Ganancia_para_A}(t - dt) + (\text{Actividad_A}) * dt$$

$$\text{INIT Ganancia_para_A} = 1$$

INFLOWS:

$$\text{Actividad_A} = .1 * \text{Ganancia_para_A} + \text{Actividad_A_inicial}$$

$$\text{Ganancia_para_B}(t) = \text{Ganancia_para_B}(t - dt) + (\text{Actividad_B}) * dt$$

$$\text{INIT Ganancia_para_B} = 1$$

INFLOWS:

$$\text{Actividad_B} = .1 * \text{Ganancia_para_B} + \text{Actividad_B_inicial}$$

$$\text{Recurso_Común}(t) = \text{Recurso_Común}(t - dt) + (\text{Renovación_del_recurso} - \text{Actividad_A} - \text{Actividad_B}) * dt$$

$$\text{INIT Recurso_Común} = 100$$

INFLOWS:

$$\text{Renovación_del_recurso} = 10$$

OUTFLOWS:

$$\text{Actividad_A} = .1 * \text{Ganancia_para_A} + \text{Actividad_A_inicial}$$

$$\text{Actividad_B} = .1 * \text{Ganancia_para_B} + \text{Actividad_B_inicial}$$

$$\text{Actividad_A_inicial} = 0$$

$$\text{Actividad_B_inicial} = 0$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2.3 Adversarios accidentales

Una estructura tipo “adversarios accidentales” se caracteriza por un ciclo reforzador, el cual es compensado por dos ciclos balanceadores internos.

En el ejemplo que se muestra, el éxito de A depende la actividad de B , mientras que el éxito de B depende de la actividad de A . Esta es una estructura reforzadora simple.

Tanto A ó B , ó ambos, pueden hacer esfuerzos para incrementar su propia actividad tratando de aumentar su éxito. Su incremento en la actividad, resulta en un decremento en la actividad y el éxito del otro, y termina en la limitación recíproca de su propio éxito. Esta es definitivamente una de esas situaciones en donde no hacer nada es mejor.

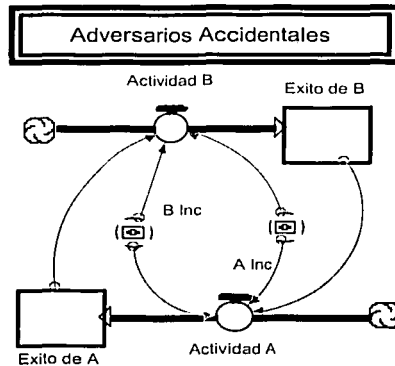


Figura 4.12 Modelo prototípico de la estructura adversarios accidentales

$$\text{Exito_de_A}(t) = \text{Exito_de_A}(t - dt) + (\text{Actividad_A}) * dt$$

$$\text{INIT Exito_de_A} = 1$$

INFLOWS:

$$\text{Actividad_A} = .1 * \text{Exito_de_B} + \text{A_Inc} - 5 * \text{B_Inc}$$

$$\text{Exito_de_B}(t) = \text{Exito_de_B}(t - dt) + (\text{Actividad_B}) * dt$$

$$\text{INIT Exito_de_B} = 1$$

INFLOWS:

$$\text{Actividad_B} = .1 * \text{Exito_de_A} + \text{B_Inc} - 5 * \text{A_Inc}$$

$$\text{A_Inc} = 0$$

$$\text{B_Inc} = 0$$

4.3 Modelación del arquetipo de desplazamiento de carga del lago de Chapala

El lago de Chapala por su ubicación geográfica refleja en su comportamiento el crecimiento de la demanda en la cuenca Lerma-Chapala y el efecto de las descargas sin tratamiento previo. Con el Acuerdo de 1991, se dispusieron las aguas superficiales, pero el problema de disminución de niveles del lago persistió, generando efectos laterales negativos como la sobreexplotación de acuíferos, la política de trasvases, la dificultad en el control de la demanda, entre otros. El descenso en los niveles del lago de Chapala se presentó como síntoma de un problema mayor que era la limitada disponibilidad de agua en la cuenca.

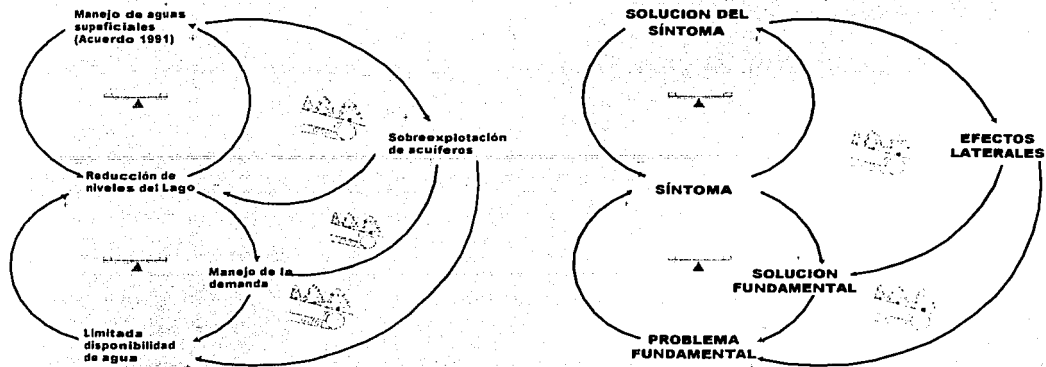


Figura 4.13 Arquetipo de desplazamiento de carga genérico y su aplicación al lago de Chapala

Para verificar la presencia de la estructura de “desplazamiento de carga”, se recurre a la construcción de un modelo matemático que demuestre la sintomatología típica de éste arquetipo, caracterizado por el comportamiento oscilatorio del síntoma unido a una reducción en el desempeño del sistema (figura 4.14).

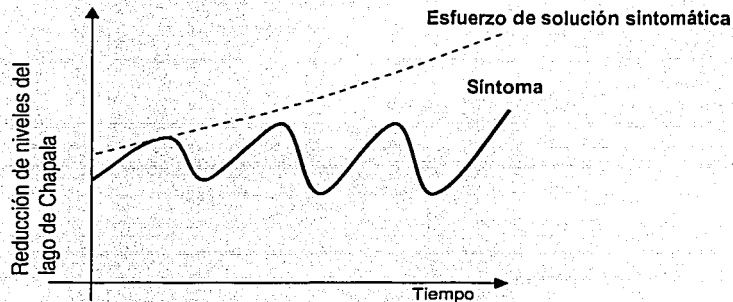


Figura 4.14 Tendencia en el tiempo de la estructura de desplazamiento de carga

La estructura del simulador matemático que se muestra en la figura siguiente, se desarrolló para exhibir el comportamiento de los niveles del lago, partiendo de un balance de aguas en el mismo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

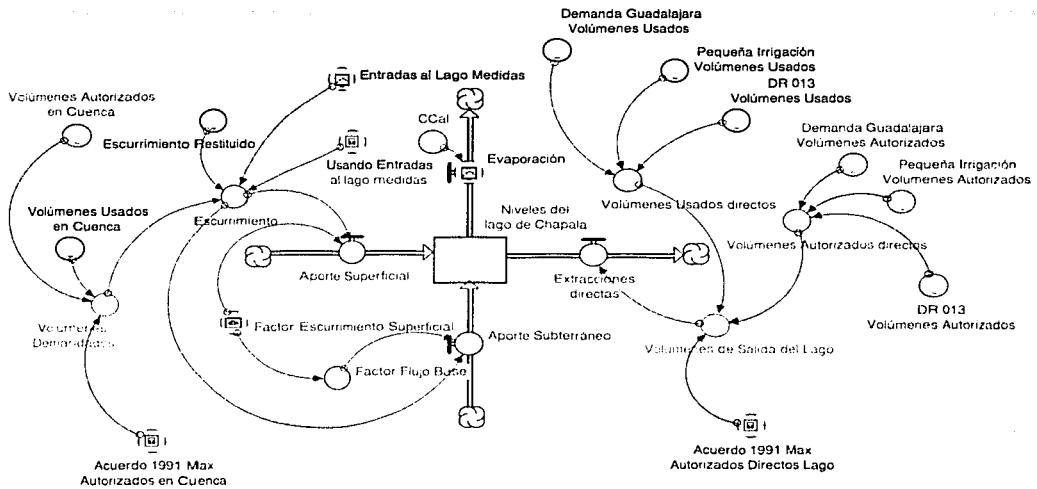


Figura 4.15 Modelo de balance de aguas en el lago de Chapala

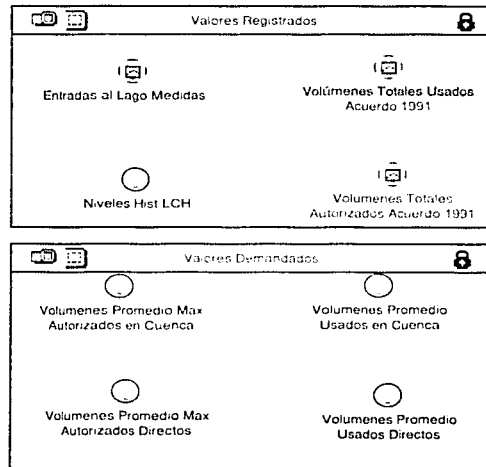


Figura 4.16 Valores registrados y demandados de aguas en el lago de Chapala

Los volúmenes de entrada que se consideraron son: el escurrimiento superficial de ingreso directo al lago (figura 4.17) y el aporte subterráneo estimado como flujo base.

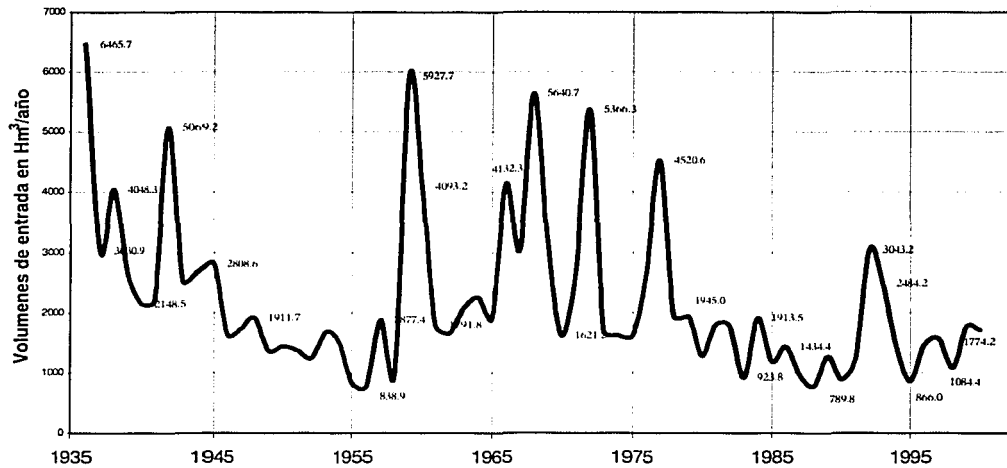


Figura 4.17 Registros históricos de volúmenes de ingreso directo al lago. Fuente: CNA,2001

Los volúmenes de salida corresponden a la evaporación (figura 4.18), con un volumen promedio estimado en 1440 hm³ por año y las extracciones directas del lago correspondientes a los volúmenes demandados por el distrito de riego 013, la pequeña irrigación y el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Guadalajara.

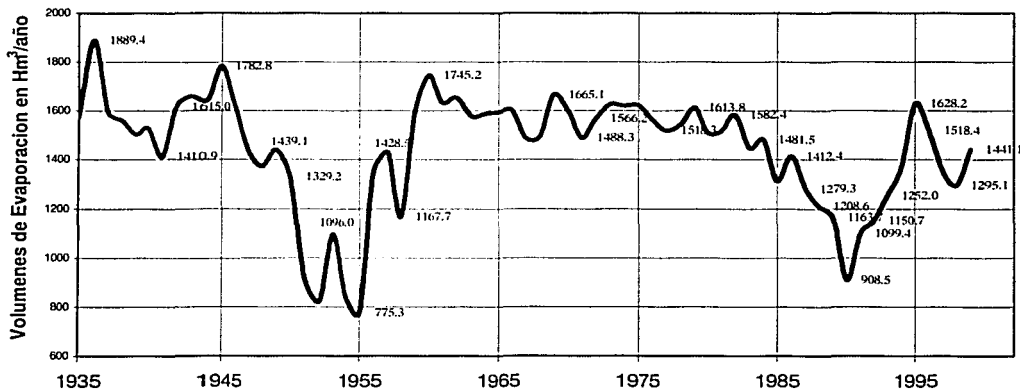


Figura 4.18 Registros históricos de volúmenes de evaporación del lago. Fuente: CNA ,2001

El modelo se calibró con registros de volúmenes históricos oficiales del lago correspondientes al período 1991-1999 (CNA, 2000). Como se observa en la figura 4.19 se logró un ajuste aceptable.

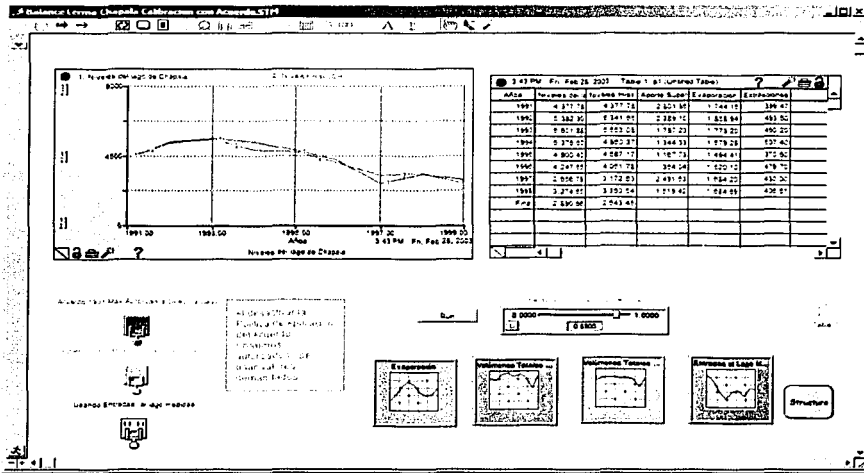


Figura 4.19 Calibración del modelo de balance hídrico del lago de Chapala

El ejercicio de modelación que se expone, permite investigar el efecto de la política de distribución de aguas superficiales con los valores máximos autorizados por el Acuerdo de 1991, frente a las demandas reales registradas (figura 4.20).

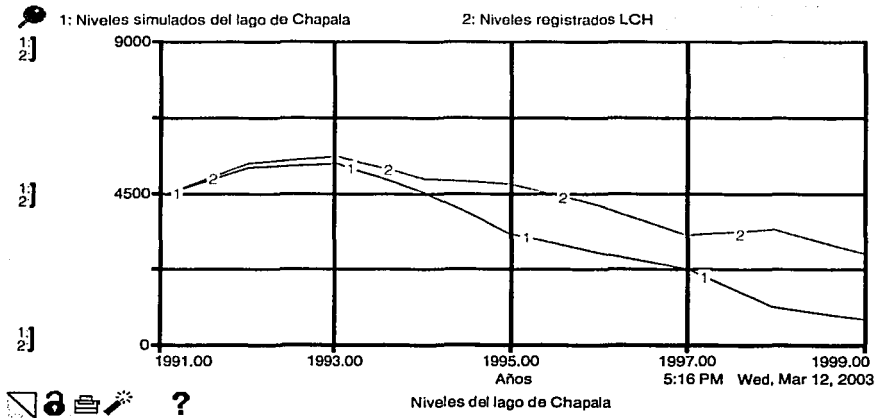


Figura 4.20 Evolución histórica de los niveles del lago (línea roja) comparada con los niveles simulados considerando la política de distribución con volúmenes máximos autorizados por el Acuerdo de 1991 (línea azul)

Años	Niveles del	Niveles Hist	Aporte Super	Evaporación	Extracciones
1991	4,377.78	4,377.78	2,708.42	1,744.15	395.47
1992	5,277.33	5,341.85	2,210.93	1,558.54	493.50
1993	5,409.08	5,553.08	1,270.53	1,773.20	490.20
1994	4,603.24	4,850.37	770.74	1,579.28	507.40
1995	3,382.57	4,657.17	1,297.76	1,454.41	370.50
1996	2,979.81	4,051.78	1,397.27	1,520.10	479.70
1997	2,545.95	3,172.83	965.08	1,654.20	430.00
1998	1,516.14	3,380.54	1,579.06	1,654.69	406.51
Final	1,199.17	2,643.45			

Tabla 4.1 Resultados de la simulación con aplicación de los volúmenes máximos asignados por el Acuerdo de 1991

El período de simulación elegido es la década de los 90's por ser un período que contiene datos de mejor calidad y certidumbre (IMTA, 2001).

Se puede observar en la figura 4.20 que la conducta sintomática de reducción de niveles del lago para el caso supuesto de consumo de los volúmenes máximos asignados por el Acuerdo (línea azul), presenta un escenario de descenso del lago más pronunciado que el real (línea roja). Lo que permite suponer que la aplicación del Acuerdo no soluciona el problema fundamental, aunque es importante mencionar que el Acuerdo logró el estancamiento del consumo agropecuario de agua superficial en la cuenca en los niveles máximos históricos.

Conviene subrayar que el régimen de lluvias es el factor determinante en esta clase de sistemas y que la gestión de las aguas debe suscribirse previendo períodos húmedos o secos. Por lo que la tendencia al descenso en la década de los 90's se debió principalmente a un periodo de lluvias escasas. En la figura 4.21 se muestran los valores normalizados de lluvias respecto al promedio.

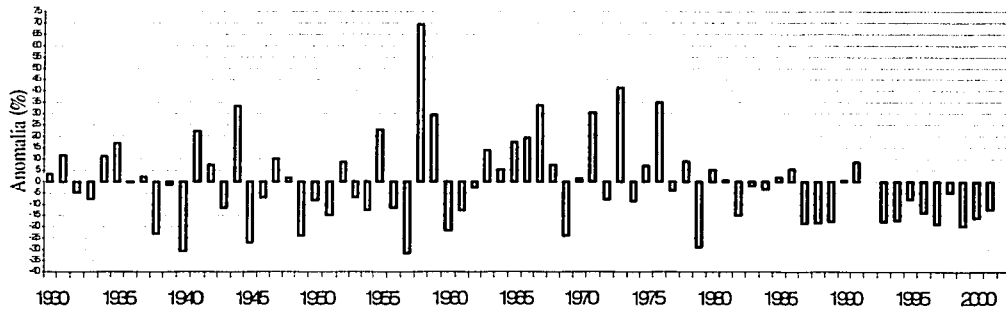


Figura 4.21 Lluvias históricas normalizadas respecto al promedio. Período 1930-2002. Fuente: IMTA, 2001

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

La distribución heterogénea del agua en la Tierra, unida al acelerado crecimiento poblacional y al incremento en los niveles de vida de los seres humanos, han fomentado el aumento en el consumo tanto en términos absolutos como per cápita y se observa un panorama mundial de escasez zonificada.

Sin embargo, a pesar del alto consumo de agua en el mundo aún persisten carencias:

- o Un 20% de la población no tiene acceso al agua potable.
- o Un 50% de la población no tiene acceso al saneamiento.
- o Un 15% de la población consume 2000 calorías/día, por lo que se encuentra en desnutrición (WWC, 1999). Se calcula que 815 millones de habitantes del planeta padecen de desnutrición. (WWDR, 2003).

Tanto los escenarios de disponibilidad futura como las nuevas condiciones de manejo del agua, plantean una importante modificación en el paradigma de los recursos hidráulicos: *el problema principal del futuro no será el aprovechamiento de las fuentes de agua, ya explotadas a niveles cercanos a su máximo; sino la gestión adecuada del agua*. Los conceptos y filosofías básicas en la gestión del agua están atravesando cambios fundamentales, la visión integral de la problemática del agua es primordial. En este contexto, la dinámica de sistemas al ser una metodología de estudio y manejo de sistemas

retroalimentadores complejos, como los observados en sistemas sociales, económicos y naturales, es aplicable al análisis de ésta compleja problemática.

En sistemas reales se han detectado estructuras sistémicas recurrentes (Senge, 1990) conocidas como *arquetipos sistémicos*. Estas estructuras permiten construir modelos cualitativos que describen un problema real a partir de variables de estado o de control y de sus interrelaciones. De estos modelos, es posible derivar soluciones de fondo, y no pseudo soluciones que con frecuencia no hacen sino agravar el problema.

El presente trabajo demostró la aplicabilidad de los *arquetipos sistémicos* para describir problemas reales de la gestión de los recursos hidráulicos. Estos modelos prototípicos universales comprobaron su eficacia para el caso particular de manejo de cuencas. Considerando la cuenca como unidad física básica de todos los procesos naturales y además unidad modular para el desarrollo agrícola, ambiental y socioeconómico.

El caso de estudio seleccionado fue la cuenca Lerma-Chapala, que presenta un profundo deterioro ambiental y el mayor impacto socioeconómico nacional por sus dimensiones y por ser el área de concentración de gran parte de la actividad económica mexicana. Una de las manifestaciones más graves de los problemas de manejo del agua en la cuenca Lerma-Chapala es la fuerte disminución de niveles en el lago de Chapala, punto final de la cuenca del río Lerma. El lago de Chapala por su ubicación geográfica refleja en su comportamiento el crecimiento de la demanda en la cuenca y el efecto de las descargas sin tratamiento previo.

Se elaboró un diagrama de ciclos causales para el lago de Chapala con las principales variables que intervienen en el sistema y se descubrieron comportamientos anómalos típicos de sistemas reales.

En la problemática del lago de Chapala, la presencia de varios actores: usuarios de agua (agricultores, industriales, domésticos y pecuarios) que explotan el recurso hídrico limitado, pensando sólo en la necesidad individual de su actividad; manifiesta la presencia del arquetipo "*tragedia de los comunes*".

A raíz de una probable catástrofe venidera frente al uso indiscriminado de algunos recursos de uso común, Orstron (2000) después de un prolífico análisis de muchas instituciones de autogestión colectiva, propone el Gobierno de los bienes comunes (*Governing the Commons*) sin consumirlos en exceso y controlando al mismo tiempo los costos de administración.

Un avance en materia de autogestión del recurso hídrico, se dio en 1993 al constituirse el primer Consejo de Cuenca en México, el Lerma-Chapala. Mismo que aplica el Acuerdo de distribución de aguas superficiales de 1991 entre usuarios de la cuenca, así como el saneamiento de aguas residuales municipales de la región Lerma y del lago de Chapala.

Las reglas de asignación de aguas superficiales acordadas en 1991 no solucionaron el problema fundamental de la cuenca, que es la limitada disponibilidad del agua, sino únicamente se planteó una solución sintomática provocando efectos laterales negativos

como la sobreexplotación de acuíferos, la política de trasvases, la dificultad en el control de la demanda, entre otros. Para hacer evidente este problema, se utilizó el arquetipo de “*desplazamiento de carga*”, que permite visualizar una solución de fondo al problema, y no sólo sintomática.

Otro de los problemas más graves en la cuenca es el deterioro de la calidad de agua del lago de Chapala. Las descargas municipales y los escurrimientos agrícolas generados en los diferentes usos del agua, transportan una carga contaminante perjudicial. Ante esta circunstancia, el lago presenta un comportamiento típico de lagos someros, caracterizado por la resuspensión de sedimentos que inhiben la penetración de luz, que limitan drásticamente la producción de fitoplancton y fomentan la proliferación del lirio acuático en la superficie del lago. Este problema se analizó y elaboró un “*arquetipo sistémico de lagos someros*”.

En particular para la cuenca es necesario realizar una gestión integrada del recurso considerando todos los factores que inciden en el proceso de administración, es decir los factores ambientales, sociales, legales, de medio ambiente, y no sólo el aprovechamiento del agua, como era usual. En atención a esto y observando los principios rectores de gestión se proponen las siguientes recomendaciones para la cuenca Lerma-Chapala:

1. Administrar el recurso hídrico de manera holística considerando todas las fuentes de disponibilidad de aguas en la cuenca Lerma-Chapala: aguas superficiales y aguas subterráneas (solución al arquetipo de desplazamiento de carga).
2. Debe realizarse una lucha efectiva contra la contaminación, propiciando la construcción de plantas de tratamiento. Así mismo aplicar el principio “usuario contaminador-pagador”. Anualmente se generan alrededor de 400 hm³ de aguas residuales con una carga contaminante del orden de 169,000 ton de DBO por año.
3. Controlar la explotación de acuíferos, principalmente en los acuíferos del Valle de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, los acuíferos del Valle de Querétaro de Celaya y de León, así como en el Río Turbio y Pénjamo-Abasolo. La sobreexplotación de acuíferos llega a afectar la disponibilidad de aguas superficiales sobre todo en los periodos de estiaje al disminuir el flujo base.
4. Promover el uso eficiente del agua y el reúso. Mejorar la eficiencia estimada en el sector agrícola en un 39% de riego promedio anual para los distritos de riego y en un 56% para las unidades de riego. Mientras que en las zonas urbanas se observan elevados porcentajes de fugas y tomas clandestinas que deben ser vigilados (solución al arquetipo de tragedia de los comunes).

Mediante los arquetipos propuestos, ha sido posible explicar y con ello proponer soluciones al manejo del agua en la cuenca.

Con lo anterior, se demuestra la aplicabilidad e importancia del uso de los arquetipos, que pueden dar origen a verdaderos “arquetipos del manejo del agua”.

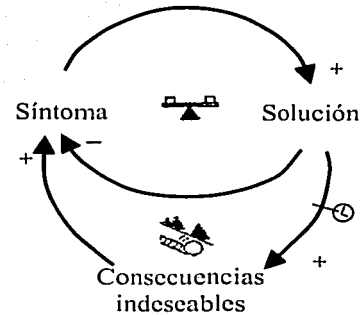
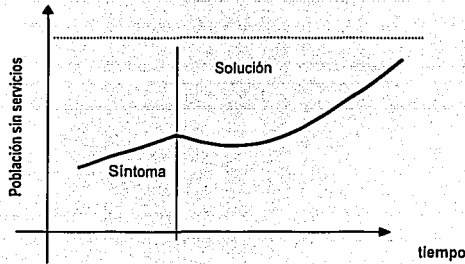
Anexo A. Arquetipos Sistémicos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A.1 Soluciones rápidas que fallan

Estructura: Soluciones que reducen el síntoma en el corto plazo, pero que empeoran la situación en el largo plazo.

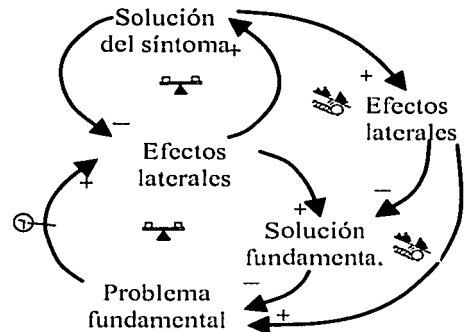
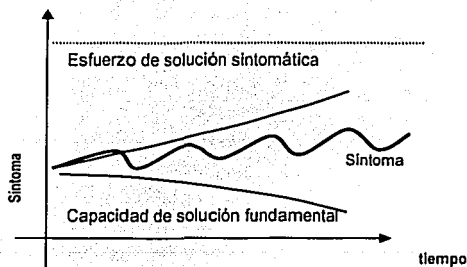
Comportamiento: asociado a una disminución repentina del síntoma, con un repunte (casi siempre peor), de la situación que se deseaba resolver.



Principio administrativo: Tener cuidado con el largo plazo. Usar la solución sólo para ganar tiempo mientras se encuentra y se elimina el verdadero problema. Recordar que el síntoma no es más que una manifestación de una situación problemática.

A.2 Desplazamiento de carga

Estructura: Se elimina el síntoma de un problema, pero no se ataca la causa fundamental. La solución sintomática genera consecuencias no deseadas (efectos laterales) que bien pueden reforzar el problema fundamental o reducir la eficacia de las acciones correctivas de fondo.



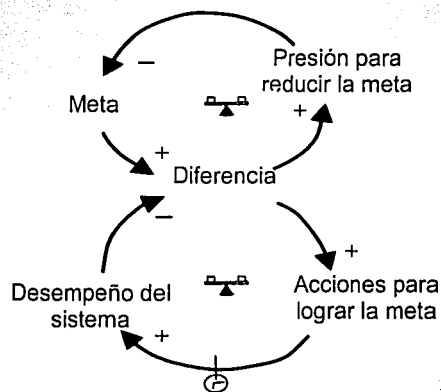
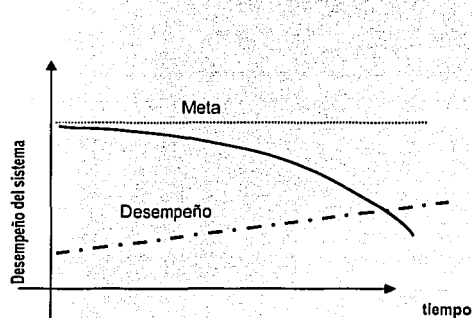
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Comportamiento: asociado a un crecimiento del síntoma o un decremento del desempeño del sistema, aunado aun mayor esfuerzo para hacer que las soluciones sintomáticas surtan efecto y un decremento de la capacidad para solucionar el problema fundamental.

Principio administrativo: Concentrarse en la solución fundamental, si la solución sintomática es imperativa (por las demoras en la solución fundamental, úsela para ganar tiempo mientras se trabaja en la solución fundamental).

A.3 Erosión de metas

Estructura: Fijar una meta al inicio de un proyecto, que a medida que pasa el tiempo se vuelve difícil de alcanzar, por lo que se decide reducirla después de no ver los resultados esperados.

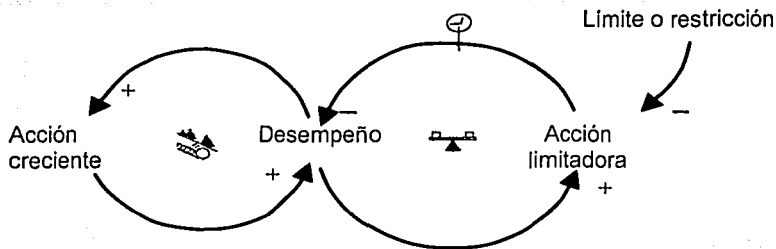


Comportamiento: asociado a resultados que siguen sin ser los esperados, hasta que la presión para reducir la meta sube y se reduce. Finalmente, se presenta el resultado del proyecto como un éxito, porque se logró la meta (erosionada).

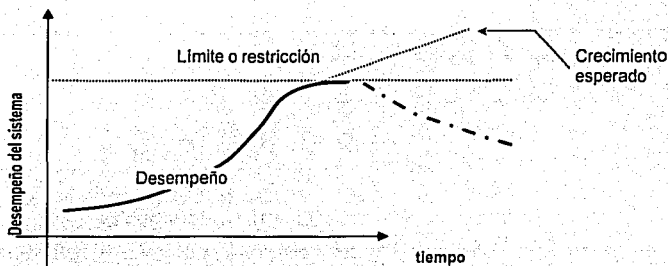
Principio administrativo: Sustener la visión de largo plazo, (lo que implica resistir la presión de reducir la meta), enfatizar con la gente disciplinas del Dominio Personal y de Visión Compartida.

A.4 Límites del crecimiento

Estructura: Crecimiento de una organización sin que se ponga atención en invertir en sus recursos y en la infraestructura que necesitará a futuro, para mantener su ritmo de crecimiento. Finalmente el éxito se acaba y, aunque se siga presionando, el sistema ya no responde.



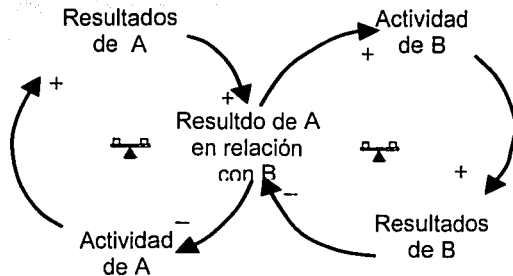
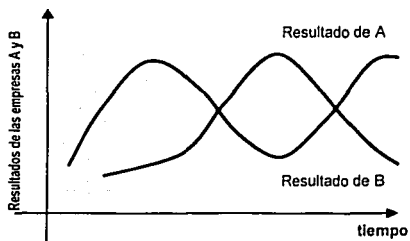
Comportamiento: asociado a un rápido crecimiento en el desempeño del sistema, para luego estancarse cuando llega el límite. En ocasiones el estancamiento se convierte en declinación del desempeño.



Principio administrativo: No presionar el proceso de refuerzo, porque no se conseguirá mucho. Mejor, identificar y procurar eliminar o debilitar el proceso limitativo.

A.5 Escalada

Estructura: Dos personas u organizaciones entienden que su bienestar depende de una ventaja relativa de una sobre la otra. Cuando una se adelanta, la otra se siente amenazada y actúa con mayor agresividad para recobrar su ventaja, lo cual amenaza a la primera, aumentando su agresividad, y así sucesivamente.

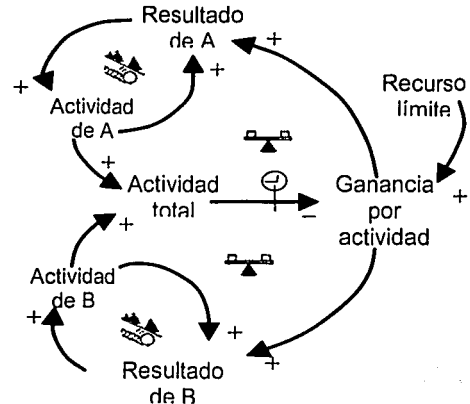
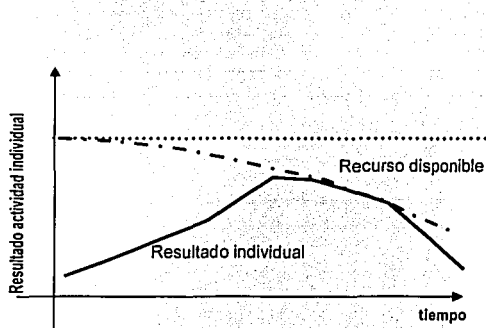


Principio administrativo: El síntoma asociado es “Si nuestro oponente se aplacara, podríamos dejar de librar esta batalla para hacer otras cosas”.

Buscar el modo de que ambas partes “ganen” o alcancen sus objetivos.

A.6 Tragedia de los comunes

Estructura: Varios actores usan un recurso común limitado, pensando sólo en su necesidad individual.



Comportamiento: asociado a un éxito inicial, pero cuando el recurso empieza a ser insuficiente para todos, intensifican sus esfuerzos, acabando con el recurso restante.

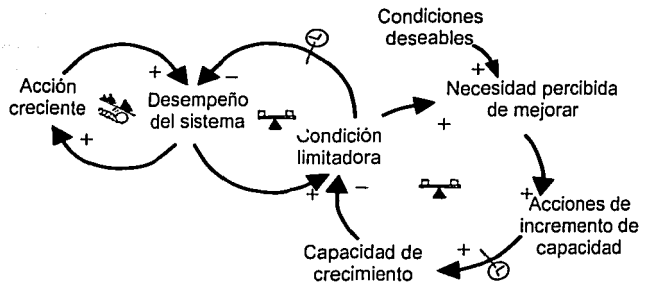
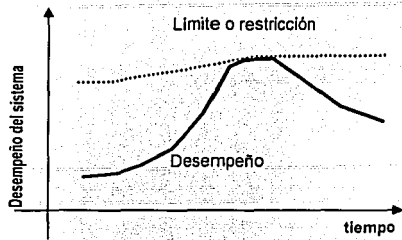
Principio administrativo: Educar a todos en el cuidado y mantenimiento del recurso, idealmente los participantes diseñarán su propio mecanismo.

A.7 Crecimiento y subinversión

Estructura: El crecimiento se aproxima a un límite que se puede eliminar o desplazar hacia el futuro si la empresa o individuo invierte en “capacidad” adicional. Pero la inversión debe ser intensa y rápida para impedir la reducción del crecimiento, pues de lo contrario no se hará nunca.

Comportamiento: A menudo las metas decisivas o las pautas de desempeño se rebajan para justificar la subinversión. Cuando esto ocurre, hay una profecía autopredictiva donde las metas más bajas conducen a expectativas más bajas, que luego se traducen en un mal desempeño causado por la subinversión.

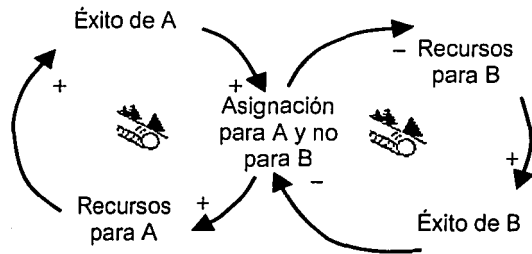
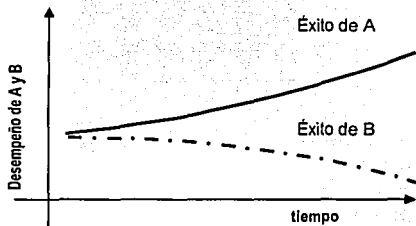
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Principio administrativo: Si hay un potencial genuino para el crecimiento, construye capacidad anticipándote a la demanda, como estrategia para generarla, y sostén la visión de largo plazo, sobre todo para evaluar las pautas de desempeño y la capacidad para satisfacer la demanda potencial.

A.8 Éxito para quien tiene éxito

Estructura: Actividades que compiten por recursos limitados.



Comportamiento: A mayor éxito, mayor respaldo, con lo cual una de ellas se queda sin recursos.

Principio administrativo: El síntoma asociado es que una de las dos actividades, grupos o individuos interrelacionados comienza a andar muy bien mientras el otro apenas subsiste. Buscar la meta abarcadora de logro equilibrado de ambas opciones. En algunos casos romper o debilitar el eslabonamiento entre ambas.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Bibliografía

Capítulo 1 Gestión integral de los recursos hidráulicos

Annen, G. (1990) *The Emscher river – a model of integrated water management in an urbanized area: problems and challenges*, Hydrological processes and water management in urban areas, IAHS Publ, no.198, 1990 pp 347-352

Bernhardi, L.; Beroggi, G.E.; Moens, M.R. (2001) *Sustainable water management through flexible method management*, Water Resources Management, n 14. 2000. pp 473-495

Buras, N. (2000) *Building a new water resources projects or managing existing systems?*. Water International. Vol. 25. num 1. pp 110-114

Deyle, R. E. (1995) *Integrated water management: contending with garbage can decisionmaking in organized anarchies*, Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, vol. 31 no.3, June 1995 pp 387-398

Conferencia de Dublín (1992) *International Conference on Water and the Environment, Dublin Economic value of water, women, poverty, resolving conflicts, natural disasters, awareness*

D'Luna, A. F. *Manejo del agua y ordenamiento ecológico*, Protección ambiental para el sector hidráulico, ponencias seleccionadas pp 83-94

Geldof, G. D. (1995) *Adaptive water management: integrated water management on the edge of chaos*, Water Science and Technology, v 32 n 1 1995. pp 7-13

Gleick, P.H. (2000). *The changing water paradigm. A look at twenty-first century water resources development*. Water International. Vol. 25. num. 1 pp 127-138

Fernández-Jáuregui, C. A. (1997) *El agua como fuente de conflictos*. UNESCO PHI

Gondwe, E. (1990) *Water management in urban areas of developing countries*, Hydrological processes and water management in urban areas, IAHS Publ, no.198, 1990 pp 337-340

GWP (2000), *Integrated water resources management*, Technical Advisory Committee of the Global Water Partnership, Sweden, pp 74

Hamdy, A. (1995) *International conference on land and water resources management in the mediterranean region*, International Journal of Water Resources Development, vol. 11 no. 3, 1995 pp 335-336

Hernández, R. V. *Uso integral del agua en instalaciones de Pemex-petroquímica, región Coatzacoalcos-Minatitlan*, Protección ambiental para el sector hidráulico, ponencias seleccionadas pp 99-105

Heinz, I. (1990) *Ecological and economic advantages of an integrated water management*, Hydrological processes and water management in urban areas, IAHS Publ, no.198, 1990 pp 331-336

Kulshreshtha, N.S. (1998), *A global outlook for water resources to the year 2025*, Water Resources Management, n 12. 1998. pp 167-184

Martínez Austria, P. (2001) *Paradigmas emergentes para el manejo del agua en el siglo XXI*. Revista Ingeniería Hidráulica en México. vol. XVI. Num. 4. pp 127-143

Martínez-Austria, P. (2002) *Principios rectores de la gestión integrada del agua para México*. Revista Tlaloc. Asociación Mexicana de Hidráulica. Próxima publicación

Marsalek, J. (1990) *Integrated water management in urban areas*, Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas, IAHS Publ, no.198, 1990 pp 315-329

Mukherjee, G. (1990) *Wetland management in the context of regional planning, East Calcutta – A case study*, Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas, IAHS Publ, no.198, 1990 pp 341-345

Post, R. A. M.; Kolhoff, A. J.; Velthuyse, B. J. A. M. (1998) *Towards integration of assessments, with reference to integrated water management projects in third world countries*, Impact Assessment and Project Appraisal vol. 16 (1): pp 49-53

Reed, S. *Water resources development: a sustainable strategy for England and Wales*, Protección Ambiental para el Sector Hidráulico, Ponencias Seleccionadas pp 39-49

Reed, S. *Strategic planning and environmental management in the environment agency*, Protección Ambiental para el Sector Hidráulico, Ponencias Seleccionadas pp 50-56

Schilling, J. (1990) *The management of available water resources as a basis for pollution control and rational use*, Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas, IAHS Publ, no.198, 1990 pp 83-88

Srageldin, I. (1995) *Water Resources Management: A New Policy for a Sustainable Future*, International Journal of Water Resources Development, vol. 11 no. 3, 1995 pp 221-232

Tremblay, N.; Delisle, Claude E; (1997) *Mettre en place une gestion intégrée des eaux au Québec: éléments de réflexion (Integrated water management system in Québec: Issues to be considered)*, Vecteur Environnement, Diciembre 1997, 30 (6): pp 21-25

Van Rooy, P T J C ; Anderson, D L ; Verstraelen, P J T (1993) *Integrated water management considers whole water system*, Water Environment & Technology, April 1993, Vol. 5, No. 4, pp 38-40

Ventura, M. ; Olcese, O. (1996) *Capacity building for sustainable water sector development in Peru*, International Journal of Water Resources Development vol. 12, no. 4 pp 491-501

Wisserhof, J. (1995) *Enhancing research utilization for integrated water management*, Water Science And Technology, 1995 , v31, n 8, pp 311-319

World Water Council (2000) *World Water Vision. Making Water everybody's business*, Earthscan Publ. London. pp 107

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

World Water Council (2002) *World Water Actions, Third Draft. 3rd World Water Forum*. October 31, 2002. pp 149

WWDR (2003) *The World Water Development Report: Water for People, Water for Life* UNESCO Publishing. World Water Assessment Programme for development, capacity building and environment

Capítulo 2 Introducción a la quinta disciplina y los arquetipos sistémicos

Camino, G. A.; Sainz, R. (2002) *International watersheds management: A systemic point of view*. First International Simposium on Transboundary Waters Management, AMH, México

Miranda H. (2001), *El enfoque sistémico y la mente organizacional (sistemas bajo el holismo batesoniano y el cambio de paradigmas)*, Fortune City, Haroldo Miranda, Octubre 2001, <http://www.fortunecity.com/victorian/manet/3/esistemico.html>

Martínez, I.; Galarza, J.; Martínez, J.R. (2001), *Intervenciones organizacionales utilizando pensamiento sistémico*, Grupo de Proyectos - Dinámica Empresarial Integral, Octubre 2001, <http://www.proyectoscom.com.mx/editorial.html>

Senge, Peter M. (1990) *La Quinta Disciplina - El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*, Editorial Granica, México, 490p

Senge, Peter M.; Ross R.; Smith B. y otros (1995) *La Quinta Disciplina en la práctica-estrategias y herramientas para construir la organización abierta al aprendizaje*, Editorial Granica, México, pp 593

Rodríguez, R. A. *Organizaciones inteligentes mediante la práctica de las cinco disciplinas sistémicas, Sistémica: Nuevos Desarrollos*, Ricardo A. Rodríguez Ulloa, Mayo 1998, Concytec Perú, Octubre 2001, <http://www.concytec.gob.pe/las/oi5ds.htm>

Spencer, Roberta L. *What is system dynamics*, System Dynamics Society, Jack Pugh, 13/8/01, Octubre 2001, <http://www.albany.edu/cpr/sds/>

Capítulo 3 Arquetipos sistémicos para el manejo del agua

Consejo de Cuenca Lerma-Chapala (2000) *Acuerdo de coordinación para la disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales, Agosto 1991*, pp 119

Mestre, Eduardo (1993) *Avances en la gestión del agua y sus finanzas en la cuenca lerma-chapala*, 1ra Reunión Internacional sobre Economía del Agua y Medio Ambiente, Julio 1993

Ostrom, Elinor (2000) *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action*, New York Cambridge University Press, 1990

Hardin, Garret (1968) *The tragedy of the commons*, Science, Vol. 162. pp 1245-1248

ESTA TESIS CON SALE
DE LA DE ORIGEN

Hardin, Garret (1998) *Extensions of 'the tragedy of the commons'*, Science, 1 May 1998, pp 682-83

IMTA (2001) *Análisis de la problemática de calidad y cantidad de agua en el lago de Chapala*. Convenio de Proyectos 2001 SGP – IMTA

Forrester, Jay (1989) *The beginning of system dynamics*. Banquet Talk at the international meeting of the System Dynamics Society. Stuttgart, Germany July 13, 1989

Navarrete, J. D. (1999) *Introducción a la irrigación bajo el enfoque de sistemas*. Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo, 1999. pp 219

Mitchell, B.; Muckleston, K.; Ericksen N. J. y otros (1990) *Integrated water management-international experiences and perspectives*, Belhaven Press (Pinter Publishers), Gran Bretaña, pp 225

Ritchie-Dunham, J.; Rabino, H. (2001) *Managing from Clarity*, John Wiley & Sons Ltd., England, pp 232

Roberts, N. (2001) *Introduction to computer simulation, a system dynamics modeling approach*, MIT System Dynamics Group's Roads Maps series, Chapter 13

Capítulo 4 Modelación de los arquetipos sistémicos

CNA (2000) Comisión Nacional de Agua, *Documento de optimización de disponibilidad de aguas superficiales*, México

Hardin, Garret (1968) "*La tragedia de los espacios comunes*" publicado en Daly, Herman. (1989a) *Economía, ecología y ética: Ensayos hacia una economía en estado estacionario*, México: Fondo de Cultura Económica, 1989

System Dynamics Group (1994) *Road Maps, System Dynamics in Education Project*. Sloan School of Management Massachusetts Institute of Technology. Revised by Jay Forrester (2000)

Roberts, N. (2001) *Introduction to computer simulation, a system dynamics modeling approach*, MIT System Dynamics Group's Roads Maps series, Chapter 13, 15. Noviembre 2001

TRFIC CON
FALLA DE ORIGEN