

conclusión, en sistemas en los cuales la estructura a gran escala es independiente de los finos detalles de la subestructura, *simplicidad* es la tendencia de que reglas sencillas emerjan del desorden y complejidad subyacente. La *complejidad* es la tendencia de sistemas interactuantes a coevolucionar de una manera que cambios en ambos conduzcan a un crecimiento de la complejidad desde simples inicios –complejidad que no es posible de predecir en detalle, pero cuyo curso general es comprensible y pronosticable (Cohen y Stewart 1994).

### 6.3.3 Sistemas disipativos en el borde del caos

Hoy la termodinámica es una ciencia clave para la comprensión y descripción general del *cambio*. El primer principio de la termodinámica corresponde a la ley de la conservación de la energía. El segundo, en su versión original, describe la evolución de un sistema aislado, que no intercambia energía ni materia con el exterior. El segundo principio de la termodinámica aporta la irreversibilidad del tiempo; el tiempo no como repetición sino como degradación o decadencia. En consecuencia, la *entropía* se plantea como una medida del desorden molecular, creciendo hasta un valor máximo: el equilibrio termodinámico. El segundo principio se convierte en una ley de desorganización progresiva; desde el orden hacia el caos. La propiedad más importante de la entropía radica, entonces, en que como resultado de procesos irreversibles, “orientados” en el tiempo, la entropía del universo (considerado como sistema aislado) va en aumento.

El equilibrio térmico fue por mucho tiempo pensado como el destino de todas las cosas vivientes, y del universo mismo. En efecto, la idea de equilibrio térmico llegó a ser un símbolo de la cultura popular a finales del siglo XIX resultado de la especulación que surgió por la preocupación de la eventual “muerte caliente” del universo. En los últimos decenios del siglo XX, sin embargo, la investigación en sistemas ordenados por procesos de *negentropía*, o entropía negativa, ha cambiado las ideas acerca de los procesos termodinámicos irreversibles y el rol de los mismos en un amplio rango de fenómenos de transformación. Negentropía, a diferencia de la entropía positiva, ocurre en una limitada serie de circunstancias, pero cuando se presenta sus implicaciones son profundas. Como su nombre lo indica, la negentropía representa una tendencia que va en contra de la entropía positiva y del sistema, en el cual ésta se produce, capaz de contrarrestar su descenso hacia el equilibrio térmico. Un sistema puede adoptar estructuras organizadas que son configuraciones improbables considerando el número de configuraciones posibles. Los procesos de negentropía son, por lo tanto, el material fundamental para el crecimiento y desarrollo de sistemas termodinámicos.

Esta contribución de la termodinámica a la teoría de los sistemas naturales parte de que los sistemas, en que pueden ocurrir estas particularidades, son abiertos y están sumergidos en algún entorno. Esto le da la capacidad a ciertos sistemas llamados *disipativos* de aumentar su complejidad o estructuración, transformando energía que proviene del ambiente, a través de mecanismos de aprovechamiento. Por lo tanto, para que los sistemas disipativos sostengan su crecimiento deben no solamente aumentar su potencial de negentropía, deben también eliminar entropía positiva que naturalmente se acumula a través del tiempo y que degrada la estructuración interna del sistema. Esto significa que, en la medida que los sistemas disipativos crecen y llegan a ser más complejos internamente, el precio de su incremento de complejidad estructural es el

aumento de entropía positiva. Dicha entropía es el desperdicio natural que resulta de los procesos por los cuales los sistemas disipativos se desarrollan; energía que se debe trasladar a su ambiente inmediato. Los sistemas disipativos, entonces, se caracterizan por una tensión dinámica entre su habilidad de acumular negentropía y su necesidad de transferir su entropía positiva al su medio ambiente. Si pueden soportar esta tensión, bajo circunstancias apropiadas, pueden lograr un estado de *entropía negativa neta* y persistir. De lo contrario el sistema se desarrolla hacia un estado de equilibrio termodinámico.

Siguiendo la teoría de estructuras disipativas (Nicolis y Pregogine 1989), la evolución de sistemas abiertos puede interpretarse como un movimiento del sistema fuera del equilibrio asociado con algunos procesos internos irreversibles, incrementa la tasa de disipación como medida por la producción de entropía. Inestabilidad, disparada por condiciones de no equilibrio ambiental, conduce a una mayor disipación y producción de entropía; ésta a su vez conduce a la aparición de nuevas inestabilidades. Lejos del equilibrio, la probabilidad incrementa que el sistema, con su proceso interno sea inestable con respecto a ciertas fluctuaciones.

La disipación de energía dirige la fuerza de la transformación. Esta se caracteriza por las condiciones de no equilibrio que dirigen al sistema a cruzar por un umbral crítico. Más allá de este umbral el sistema llega a ser "inestable estructuralmente" en relación con las fluctuaciones, las cuales conducen a incrementar la disipación y en un *loop* positivo de retro alimentación cambiar en el umbral.

Los sistemas abiertos para evolucionar deben evitar las situaciones de equilibrio. Sin embargo, en circunstancias de no equilibrio los sistemas pueden llegar a una situación de pseudo estabilidad que puede considerarse como una *situación estacionaria*. En tales casos en el sistema se produce cierta entropía positiva que, debido a su condición de abierto, la puede disipar totalmente al exterior. De esta manera la variación total de entropía es nula y el sistema mantiene su estructura constante. En conclusión, se necesita una termodinámica del no equilibrio para sistemas no aislados.

La termodinámica del no equilibrio parte del concepto de balance de entropía, introducido por Pregogine. El balance neto de la entropía es la suma algebraica de lo que se produce más lo que se intercambia. Sólo el término producción tiene un signo bien definido. Si se acepta la entropía como una medida del desorden, esta claro que los sistemas aislados tienen una evolución condenada hacia el máximo caos, pero en sistemas abiertos existe la posibilidad de una estructuración interior si la competencia entre los términos del balance (producción y flujo) se resuelve favorablemente.

Por lo tanto, para desarrollarse o evolucionar, un sistema disipativo debe buscar constantemente nuevos estados organizacionales y mantenerse en estados alejados del equilibrio, lo que le permite transformarse en una entidad más compleja. Ambas propiedades son fuentes de inestabilidad y por lo tanto de cambio potencial. La fuente interna de la inestabilidad de un sistema disipativo reside en su capacidad o propensividad de hacer *detecciones de frontera*. Los sistemas disipativos están constantemente tratando de transformarse, moviéndose de su estado actual de equilibrio hacia algún estado alternativo. A menudo no reciben la energía del ambiente para sostener su transformación evolutiva, pero cuando la detección coincide con un repentino y sostenido incremento de energía, debido a su condición o estado alejado del equilibrio, pueden desestabilizarse. Una perturbación puede forzar el sistema a

abandonar su estado previo de referencia e iniciar su desarrollo hacia una nueva configuración. En esta aproximación dada por Pregogine (1996), la racionalidad ya no puede seguir siendo identificada con la “certeza”, ni tampoco la probabilidad con la “ignorancia”.

La diferenciación de los seres vivos se consigue disipando más entropía de la que se produce. Los sistemas vivos roban orden a su ambiente por medio de un flujo de neguentropía. La misma termodinámica de los procesos irreversibles ofrece una nueva alternativa: el *orden por fluctuaciones* y el concepto de *estructura disipativa*. Cuando los sistemas se alejan mucho del equilibrio, la situación deja de describirse como una prolongación lógica de dicho estado. Los sistemas dejan el llamado régimen lineal de la termodinámica para entrar en el no lineal. En este régimen aparecen discontinuidades e inestabilidades, el estado estacionario compatible con las condiciones que impone el ambiente ya no es único y las fluctuaciones espontáneas –antes siempre condenadas a regresar– pueden amplificarse y arrastrar los sistemas hacia nuevos e imprevistos estados estables. Resulta pues muy interesante resaltar aquí la reconciliación entre azar y determinismo. La descripción de un sistema con bifurcaciones implica la coexistencia de ambos: entre dos bifurcaciones reinan las leyes deterministas, pero en su inmediata vecindad de tales puntos críticos reina el azar. Esta rara colaboración entre el azar y determinismo es un nuevo concepto de historia que propone la termodinámica moderna: *la esencia del cambio*.

Este proceso evolucionario empieza con la apariencia de comportamiento bifurcacional, que es un comportamiento fluctuante que envía el sistema a un movimiento oscilatorio entre dos o más nuevos puntos de equilibrio posible. Estas oscilaciones cíclicas indican que el sistema disipativo en cuestión se ha sea desestabilizado y ha entrado en fase caótica. En este punto dos cosas pueden suceder: el sistema se mantiene caótico, oscila siempre más rápidamente, y eventualmente se destruye el mismo, o la fluctuación se amortigua tanto como el sistema se asienta en una nueva configuración. Cuando esto ocurre el sistema se ha desarrollado, se ha reorganizado alrededor de una nuevo punto de referencia en el cual inicia su comportamiento de detección de frontera. Esta detección continua hasta que una nueva perturbación o fuerza ocurre y una nueva conjunción de condiciones externas e internas una vez más empujan el sistema a una nueva trayectoria evolucionaria. Los sistemas disipativos son, por lo tanto, entidades estructuradas caóticamente lejos del equilibrio y exhiben la denominada dependencia sensible a las condiciones iniciales.

A menudo se trata el caos en función de las limitaciones que impone, verbigracia, la falta de predecibilidad. Sin embargo, la naturaleza puede usar el caos de manera constructiva. A través de la amplificación de pequeñas fluctuaciones puede facilitar a los sistemas naturales el acceso a lo nuevo. La evolución biológica, por ejemplo, necesita de la variabilidad genética: el caos proporciona un medio de estructurar los cambios al azar, haciendo así posible que la variabilidad esté bajo el control evolutivo.

La naturaleza esta hecha de sistemas dentro de sistemas de manera indefinida. Con referencia a un determinado sistema cualquier perturbación que venga de fuera, o no sea “anticipable” desde dentro del sistema de referencia, representa una entrada de energía que destruye más o menos parcialmente un *pattern* existente y vuelve a poner en marcha un proceso que sigue ciertas vías y acaba, a su vez, al perder energía disponible, atascado en el dominio de complicación creciente. Existe un interesante espectro de frecuencias de los distintos cataclismos. El día y la noche representan

realmente algo traumático para muchos organismos; lo mismo ocurre con las estaciones, con los períodos de sequía, las inundaciones, los terremotos, las glaciaciones, las colisiones de asteroides y así sucesivamente. Lo que se debe retener en este punto es la asimetría en los cambios: la entrada de energía (la energía recibida), la perturbación y el volver a poner el sistema en una situación “inicial”, donde el despertar o recomenzar el proceso, es rápido; pero la “evolución” normal y gradual que conduce a las etapas de gran complejidad puede prolongarse indefinidamente.

Una analogía visual de un sistema en un estado crítico, estado cuasi-estable, es el montón de arena. Al conformarse por un flujo de arena continuo, el montón crece con firmeza hasta pronto alcanzar el límite. Lo que era un montón pequeño va elevándose cada vez más, hasta que, de repente, más arena puede desencadenar una pequeña avalancha y luego una grande, avalanchas de todas clases. El montón, cuando no recibe más arena adicional, representa el equilibrio en estado crítico y las avalanchas de toda gama de tamaños, provocadas por perturbaciones de la misma magnitud (otro grano de arena), representan una distribución exponencial de la respuesta: la marca de un sistema que ha alcanzado el estado crítico. Que ha alcanzado, posiblemente, el límite del caos.

Un gráfico con la magnitud de las extinciones y su frecuencia es muy parecido a una ley exponencial. No es una línea recta es ligeramente convexa (en logaritmos sería una línea recta descendente de izquierda a derecha). El mundo está en equilibrio en el límite del caos (en el borde del caos), sólo que ligeramente del lado congelado del caos (Kauffman 1993).

Los fenómenos de la naturaleza peligrosos para un asentamiento humano, como los terremotos, son la expresión del cambio en el ambiente en el cual se encuentra el sistema socio-técnico. Una configuración geológica, en efecto, es un sistema dinámico, no lineal, abierto, donde el levantamiento tectónico y la actividad sísmica representan la entrada; la masa perdida por el desperdicio y la degradación del relieve representan la salida (Keller y Pinter 1996; Brumbaugh 1999). Es el principio de antagonismo que establece que hay dos tipos de procesos activos en la formación de un paisaje en cualquier instante: el endógeno o tectónico y el exógeno o meteórico (Scheidegger 1987). Generalmente, estos dos procesos hacen más o menos un balance el uno en el otro de tal manera que el paisaje geológico es el resultado del cambio de un sistema complejo cuasi-estable o en estado crítico.

La aparente “estabilidad” se debe al hecho de que los sistemas dinámicos, no lineales, abiertos tienden a desarrollarse en estados cuasi-estables, ordenados en forma auto-organizada en el borde del caos, con un atractor fractal. Estos sistemas restablecen el orden en pasos de varias magnitudes los cuales tienen una distribución que obedece a una ley exponencial. En un conjunto fractal de dimensión  $d$ , existe una ley de potencia para subconjuntos: El número  $N$  de subconjuntos de “tamaño” (lineal)  $L$  es proporcional a  $L \exp(-d)$ . La curva de recurrencia de magnitudes de los terremotos ilustra el cumplimiento de dicha ley de potencia fractal –los sucesos de magnitud grande son escasos y los de magnitud pequeña son comunes– y la existencia de un dominio auto-estructurado. La saturación (sismos máxima magnitud) indica las limitaciones de la ley y de paso las fronteras del dominio.

En el sistema socio-técnico –el asentamiento humano–, los “desastres” no son otra cosa que sucesos sociales de diferentes magnitudes. Al igual que en su entorno natural, estos eventos están gobernados por una ley exponencial. El asentamiento humano es una configuración o estado cuasi-estable que no corresponde simplemente a una

situación de equilibrio dinámico, sino más bien a un orden auto-organizado o auto-estructurado; resultado de múltiples perturbaciones internas y externas, entre otras: desastres. Las condiciones de vulnerabilidad del sistema socio-técnico, en todas sus dimensiones (física, económica, social, política, etc.) caracterizan su inestabilidad que favorece la ocurrencia de crisis. Se trata de esa “susceptibilidad” del sistema complejo no lineal que representa su condición de estado crítico o de estar en el borde del caos.

#### 6.4 Representación conceptual de riesgo, desastre y gestión

Un sistema socio-técnico como el asentamiento humano es, termodinámicamente, un sistema abierto, es decir intercambia materia y energía con su ambiente, que en este caso es al ambiente natural. El balance entrópico refleja en qué forma puede mantenerse una situación o estado estacionario; es decir la estructura o configuración física y social del asentamiento humano. El sistema envía al ambiente toda la entropía que en su interior se produce, lo que puede llegar a afectar nocivamente al ambiente, degradándolo, e incluso desencadenar respuestas de ese ambiente impactado. La persistencia del sistema en un estado estacionario equivale entonces a la conservación de una estructura o grado de organización; que en este caso sería la estructura urbana y de la sociedad misma del asentamiento humano, que se mantiene extrayendo orden del ambiente. Por otro lado, la evolución desde una configuración, supone la adquisición de dicha estructura final al interior del medio natural, o, si se quiere, la acomodación interna del sistema a las condiciones impuestas desde afuera, como el clima, los cambios de la geodinámica interna y externa, etc. Se trata de la primera componente de la nueva esencia del cambio: la adaptación de un sistema a su entorno. Dentro del régimen lineal, la estabilidad del estado estacionario está asegurada, esto es, cualquier perturbación fortuita que suponga un desplazamiento con respecto a dicho estado es vencida por el sistema que tiende a restituirse en la situación estacionaria. Es *persistencia* del sistema socio-técnico o su *resiliencia* ante perturbaciones que ocurren a su interior o que provienen del ambiente; y que puede disipar o absorber. Si se le llama fluctuaciones a tales las desviaciones azarosas, se puede decir que, en los procesos de adaptación termodinámica, las fluctuaciones no tienen la oportunidad de progresar, se amortiguan y no llegan a trascender macroscópicamente. Las fluctuaciones regresan. En este caso, la producción de entropía es una magnitud no negativa que decrece durante cualquier evolución y que se hace constante y mínima una vez se ha alcanzado el estado estacionario. Desde el punto de vista ambiental y urbano esta circunstancia significa el *desarrollo sostenible* y una alta resiliencia ante los fenómenos ambientales. Esta es una ley física, enunciada y demostrada por Prigogine bajo la denominación del principio de la mínima producción de entropía, para el fenómeno de un sistema adaptándose a su entorno. Es la “anticipación” para evitar la crisis que pueda significar un cambio de estado o hasta la destrucción misma del sistema. Esto, desde la perspectiva del riesgo y los desastres, no es otra cosa que la *prevención-mitigación* o la *reducción del riesgo*.

Superada una distancia crítica del equilibrio, es decir cuando se tiene un alto grado de *vulnerabilidad*, las ecuaciones cinéticas y fenomenológicas se hacen no lineales. Hay más de una solución. Las soluciones se bifurcan, pero sólo una es la verdadera, sólo una representa la realidad del sistema. La pregunta es ¿cuál? El azar decide. Incluso una mínima fluctuación (antes irrelevante) decide ahora el futuro del sistema

macroscópico. Es la situación de *alto riesgo*, los sistemas dejan de adaptarse y tienden a nuevos e imprevisibles estados por su alejamiento del equilibrio. El atractor en este momento vigente caracteriza el *riesgo*, es decir, la posibilidad de cambio o mutación, que en el sistema socio-técnico podría significar el *desastre*.

Para reducir la entropía, o el desorden, que se produce en los sistemas sociales es necesario conseguir negentropía que intente reducir o al menos neutralizar el proceso. Esto se traduce en un esfuerzo y un "coste" que debe asumir la sociedad con el fin de evitar el aumento y la acumulación paulatina de la *vulnerabilidad*. Actualmente la velocidad de los procesos de aumento de vulnerabilidad supera la velocidad de los procesos de solución o intervención de la misma, y un cambio de dirección significaría una "bifurcación" (Cardona 1999a) o un nuevo paradigma cuyo coste social sería relativamente igual o más alto al que causó la revolución industrial o la revolución sanitaria en siglos anteriores. Infortunadamente, el coste social de no cambiar la situación actual es también enorme y será cada vez mayor. Al respecto, miembros del Club de Roma han planteado desde los años 1970 que el pago no equitativo del coste social del proceso continuo de deterioro ambiental, que bien puede asimilarse al planteamiento anterior, y los límites del crecimiento que se establecen en términos ambientales, permiten proyectar escenarios factibles (estados del mundo) de colapso global para este siglo que se inicia (Meadows *et al.* 1994).

Elegir un sistema significa definir la frontera que le separa de su entorno. Se trata de una superficie real o ficticia, pero permeable en principio al paso de la información (influencias) en sus dos sentidos: el sistema al entorno y del entorno al sistema. La cantidad de información contenida en la fuente depende de su diversidad potencial de comportamiento. Es la "complejidad del sistema"; primera cantidad fundamental. La complejidad del entorno, es la "incertidumbre" del mismo; segunda cantidad fundamental. La tercera cantidad fundamental es la "capacidad de anticipación" del sistema que está relacionada con qué parte de la información emitida es recibida, es decir de qué tan menor es el error: Esto significa que el sistema conoce bien su entorno. El error inverso, cuanto menor sea, mayor influencia hay del sistema en el entorno; es decir, se ve más afectado. Es la "sensibilidad del entorno"; cuarta cantidad fundamental (Wagensberg 1998). Se trata de las mutuas influencias entre el asentamiento humano (el sistema socio-técnico) y el ambiente natural. La complejidad del ambiente se caracteriza por la incertidumbre que hay en la dinámica de sus influencias o sucesos que pueden causar efectos en el sistema. Estos son flujos (recursos naturales) o descargas de energía (terremotos, erupciones volcánicas, huracanes, etc.) que siguen una ley de potencia, ante los cuales el sistema debe anticiparse para beneficiarse, mejorando su estructura y aumentando su complejidad (desarrollo social, urbano, etc.), y adaptándose en forma *preventiva* para que la influencia de los sucesos naturales no le sea nociva, mediante procesos de *gestión del riesgo*.

La información neta que llega a un destino se obtiene, lógicamente sustrayendo el error a la información de la fuente. Por lo tanto: la complejidad del sistema, que paradójicamente caracteriza su susceptibilidad  $S_s$  (*susceptibility of the system*), menos su capacidad de anticipación con respecto a su entorno, o persistencia  $P_s$  (*persistence of the system*), no es más que la información o influencia que el entorno introduce al comportamiento del sistema  $I_e$  (*influence of the environment on the system*). Esta influencia es igual a la incertidumbre del entorno  $U_e$  (*uncertainty of the environment*), menos su tendencia a mantenerse estable, u homeóstasis  $H_e$  (*homeostasis of the*

*environment*), que en sentido inverso representa la sensibilidad del entorno. Así, la incertidumbre del entorno menos su sensibilidad  $Se$  (*sensitivity of the environment*), no es más que la información o influencia  $Ise$  (*influence of the system on the environment*), que el comportamiento del sistema suministra al comportamiento del entorno, lo que se puede expresar en forma general (Ecuaciones 6.2 y 6.3):

$$Ss - Ps = Ies \quad [6.2]$$

$$Ue - He = Ise \quad [6.3]$$

la condición de equilibrio estacionario por mutuas influencias (Ecuación 6.4) implica que:

$$Ies \sim Ise \quad [6.4]$$

por lo tanto, se puede establecer la siguiente equivalencia (Ecuación 6.5):

$$Ss - Ps \sim Ue - He \quad [6.5]$$

ambos mensajes contienen las mismas cantidades de información. Una perturbación en un término de la ecuación requiere el ajuste de los otros tres. Si aumenta, por ejemplo, la incertidumbre del entorno (lo más desconocido), el sistema debe aumentar su complejidad, esmerar su capacidad de anticipación, o inhibir su efecto sobre el entorno.

Usualmente, por los desequilibrios sociales y económicos los sistemas más desarrollados explotan a los menos (Margalef 1986) y los ponen a disipar más entropía, lo que se traduce en deterioro de la calidad urbana, pobreza, segregación social y un aumento diferencial de la *vulnerabilidad*; lo que aumenta la complejidad y también la inestabilidad del sistema. La *degradación ambiental* causada por las influencias del asentamiento humano sobre el hábitat natural, debido a la sensibilidad del entorno reduce su homeóstasis, lo que se traduce en efectos que aumentan su incertidumbre y, por lo tanto, el potencial de *fenómenos peligrosos* contra el mismo sistema socio-técnico.

Se puede definir el “desorden” como la entropía presente dividida por la entropía máxima posible. Entre cero y uno. Normalmente la entropía y el desorden aumentan a la vez aunque formalmente se ha podido desenganchar los conceptos de entropía y desorden; “orden” + “desorden” = 1 Pero al aumentar el espacio o la entropía máxima el desorden puede disminuir. Entropía y orden aumentan al contrario de lo que se espera. (Wagensberg 1998). De la misma manera se puede proponer que “persistencia” + “vulnerabilidad” = 1 y que “homeóstasis” + “sensibilidad” = 1. Esto se puede expresar de la siguiente forma (Ecuaciones 6.6 y 6.7):

$$Ps + Vs = 1 \quad [6.6]$$

$$Ps = 1 - Vs \quad [6.7]$$

reemplazando la Ecuación 6.7 en la Ecuación 6.5 se puede escribir (Ecuación 6.8):

$$Ss - 1 + Vs \sim Ue - He \quad [6.8]$$

además, se tienen las Ecuaciones 6.9 y 6.10,

$$He + Se = 1 \quad [6.9]$$

$$He = 1 - Se \quad [6.10]$$

lo que permiten expresar la equivalencia de la siguiente forma (Ecuaciones 6.11 y 6.12):

$$Ss - 1 + Vs \sim Ue - 1 + Se \quad [6.11]$$

$$Ss + Vs \sim Ue + Se \quad [6.12]$$

los dos términos de la izquierda de la Ecuación 6.12 expresan la susceptibilidad interna o intrínseca del sistema socio-técnico y su *vulnerabilidad* ante acciones externas. Es decir, las condiciones de inestabilidad que determinan el potencial de crisis o *desastre*. Es lo que aquí se le ha denominado: *riesgo*; el cual es función de los dos términos de la derecha de la Ecuación 6.12, que expresan la incertidumbre interna o propia de procesos dentro del ambiente y su sensibilidad ante las acciones externas que lo afectan. Es decir, el potencial de sucesos o agentes detonantes, que aquí se les ha denominado *amenazas*.

Cuando en el antagonismo del sistema-entorno se sortean todas las dificultades y se consigue no violar la ley fundamental, entonces se dice que hay “adaptación”. El sistema socio-técnico adecua su estructura para seguir siendo compatible con su ambiente. El sistema se adapta. Cuando esto no es posible, cuando una perturbación (fluctuación) en uno de los términos no puede ser absorbida por una respuesta de los otros tres, la adaptación se rompe y el sistema entra en crisis: se presenta el *desastre*. El sistema entonces, o bien se destruye, o bien cambia a otra nueva estructura; es decir, se auto-organiza o se reconstruye con una mayor capacidad o defensa de su ambiente. Sobreviene una bifurcación en cualquier caso.

El éxito del sistema socio-técnico se observa claramente en la historia a través de estos conceptos: la sociedad y su unidad humana son cada vez más complejas. La ciencia le provee de un poder de anticipación cada vez mayor *-la prevención-* y su tecnología le asegura cada vez más independencia frente a los caprichos ambientales o *fenómenos peligrosos*. Los sistemas complejos adaptativos son buscadores de pautas. Interaccionan con el entorno, aprenden de la experiencia y, como resultado, se adaptan. Así, las adaptaciones son un comportamiento determinista y las autoorganizaciones son comportamientos indeterministas, como resultados positivos posteriores a una crisis. Los sistemas adaptativos, como los asentamientos humanos, pueden hacer compatible consigo mismos el ambiente natural en que se encuentran. Pueden lograr adaptarse logrando una estructura característica, en el borde del caos, en que sus influencias con el ambiente estén mutuamente equilibradas. Eso es la *sostenibilidad*; una propiedad que puede emerger de este sistema socio-técnico si se logra establecer una adecuada anticipación o lo que aquí se le denomina la *gestión del riesgo*.

La toma de decisiones y otros aspectos del manejo de estos sistemas están llegando a ser cada vez más difíciles. Los asentamientos humanos son sistemas dinámicos complejos que se desarrollan en dominios de inestabilidad y pueden emerger en nuevas estructuras urbanas a causa de *desastres*. Es difícil conocer con precisión el estado de inestabilidad o *vulnerabilidad* de un sistema complejo de este tipo. Por lo tanto políticas y decisiones de *gestión del riesgo* deben ser desarrolladas para *prevenir* la

precipitación del sistema en un inesperado estado de inestabilidad (vulnerabilidad creciente) o de reconfiguración (reconstrucción post-desastre). Teniendo en mente la gestión del riesgo y considerando que la vulnerabilidad refleja las condiciones de inestabilidad, entonces el entendimiento de las características de los sistemas disipativos es fundamental para estimular una acción colectiva efectiva para reducir el riesgo.

Comfort (1999) identifica cuatro condiciones como las necesarias, aunque no suficientes, para iniciar una transición de un sistema organizativo: la articulación de conceptos y significados comunes entre los actores sociales; la confianza entre quienes dirigen las instituciones y los ciudadanos; la resonancia entre las instituciones en la búsqueda del cambio y los suficientes recursos y la capacidad institucional para sostener la acción colectiva. De estas condiciones depende que prevención-mitigación, la preparación para emergencias y la capacidad de respuesta ante un desastre.

La coordinación de las operaciones en caso de desastre, por ejemplo, debe llevarse a cabo de manera amplia y a través de diversos medios. Esta se basa fundamentalmente en procesos de búsqueda de información, intercambio y retroalimentación que facilitan un aprendizaje intra e inter institucional ante la situación de crisis.

La interpretación de los sistemas dinámicos complejos que aquí se ha expuesto aparte de representar la dinámica del riesgo y la vulnerabilidad también permite representar la situación de desastre y la respuesta al mismo por parte del sistema socio-técnico. En cualquier caso si el sistema no se destruye por completo debe adaptarse y ese proceso de ajuste podrá ser más o menos rápido y eficiente dependiendo de sus posibilidades reales de adaptación. En términos de Stuart Kauffman (1993), cuando se presenta un desastre la respuesta que emerge en el sistema socio-técnico representa un movimiento hacia el orden del caos que significa el desastre. Kauffman sustenta que todos los sistemas operan en un continuo entre caos y orden y que los sistemas en el extremo de ese continuo tienden a moverse hacia el centro. Es decir, que sistema en condiciones de caos se moverá hacia el orden y en una situación de orden el sistema se moverá hacia el caos. En el centro del continuo entre caos y orden se encuentra el "borde del caos" donde según Kauffman hay suficiente "estructura" para soportar y intercambiar información y suficiente "flexibilidad" para adaptarse a las condiciones ambientales. En esta región estrecha, en el borde del caos, un sistema podría ser capaz de dar una respuesta creativa a las condiciones exigentes de una situación de crisis. El balance entre estructura y flexibilidad es el criterio que define la adaptabilidad de un sistema en el proceso de respuesta en un ambiente dinámico. Lo que equivale, en el caso de una sociedad o un asentamiento humano, la integración de los componentes técnicos y organizacionales que facilita a las instituciones la capacidad para atender rápidamente y efectivamente las demandas que surgen de la complejidad que se desencadena. La respuesta en caso de desastre involucra un proceso paralelo y no lineal. Las condiciones locales gobiernan el curso inicial de la acción de la respuesta y ésta se desarrolla simultáneamente por muchos actores en diferentes lugares. Las decisiones que se toman en ciertas situaciones críticas son la base de las interacciones posteriores. El grado de resiliencia o la capacidad para adaptar los recursos y capacidades existentes a nuevas situaciones y condiciones operativas está directamente relacionada con el grado de acceso a y el intercambio de información en un sistema en proceso de cambio y ajuste. Los requerimientos de acción en sistemas sociales complejos dependen de la efectividad y amplitud de los procesos de información y comunicación que operan en el sistema. La acción colectiva requiere,

primero, estructura para la efectiva movilización de recursos, segundo, exhibir flexibilidad adaptativa para la acción.

El estudio de casos, en particular de desastres originados por terremotos (Comfort 1999) indica que se pueden presentar cuatro tipos de respuesta dependiendo de la estructura técnica, la flexibilidad y la apertura cultural al uso de tecnología en el sistema socio-técnico. Estos tipos de respuesta son: respuesta no adaptativa (inadecuada para nivel de riesgo que existe), adaptativa emergente (insuficiente pero aceptable movilización), adaptativa operativa (reacción adecuada con restricciones) y auto adaptativa (innovadora, creativa y espontánea). Cada tipo de adaptación corresponde a una respuesta del sistema socio-técnico según el nivel de efectividad de su estructura técnica y nivel de organización, los cuales producen varios patrones de acción, inacción, innovación y determinación para restaurar las funciones de la comunidad.

Louise K. Comfort de la Universidad de Pittsburgh, con base en los planteamientos aquí expuestos –que el autor ha compartido con esta investigadora desde hace varios años– y el estudio que realizó sobre once desastres causados por terremoto en diferentes países propone un modelo que identifica cinco fases o estados en la evolución de la respuesta operativa después de un desastre: las condiciones iniciales (que a criterio del autor corresponden al riesgo mismo), la búsqueda de información, el intercambio de información, el aprendizaje intra e inter institucional y el comportamiento adaptativo. El primer estado representa las condiciones existentes en la comunidad antes del terremoto. Estas condiciones incluyen no sólo las características físicas de la comunidad sino también sus condiciones sociales, económicas y políticas, las cuales inciden en la capacidad organizacional para la acción colectiva. Una vez ocurrido el sismo se desencadena la necesidad de recuperación de la comunidad y se activan una serie de procesos de información –búsqueda e intercambio de información– que sirven como base para la acción colectiva. Estos procesos interactivos conducen a un aprendizaje al interior de las instituciones de manera individual, las cuales contribuyen a su vez a esquemas interinstitucionales entre las entidades involucradas en las operaciones de respuesta.

Las tres fases dinámicas –búsqueda de información, intercambio de información y aprendizaje intra e inter institucional– culminan en un comportamiento adaptativo, el cual representa un ajuste ante el desastre, que no es más que la respuesta ante el mismo. El grado de coherencia alcanzado en dicha respuesta refleja la amplitud con que la comunidad ha sido capaz de llevar a cabo las tareas para enfrentar las demandas urgentes causadas por el impacto del fenómeno. La coherencia, según Comfort (1999) se puede medir con el número, densidad y tipo de transacciones o interacciones realizadas entre las instituciones involucradas durante las operaciones de respuesta. Según Priesmayer (1994) dicha coherencia se puede estimar evaluando las diferentes funciones de respuesta ante un desastre, lo que se puede estimar con el análisis de regresión logística no lineal desarrollado por el mencionado investigador. Las figuras 6.2 y 6.3 ilustran dos casos en los cuales hay y no hay un comportamiento caótico en funciones como la recuperación y reconstrucción por entidades del sector privado y la evaluación de daños por parte de instituciones públicas (durante un lapso de 21 días) en el desastre causado por el sismo de 1987 en el Ecuador.

La metodología utilizada para estas estimaciones se basa en el modelo N-K propuesto por Kauffman (1993). Este investigador sugiere que el aumento de la complejidad en sistemas dinámicos complejos se puede representar considerándolos como sistemas N-K, donde N es el número de componentes dentro del sistema y K el número de interacciones

entre ellos. En un sistema N-K el proceso de coevolución depende del número de partes que interaccionan y de la frecuencia, el contenido y la dirección del flujo de información entre ellas. Aún mas, dicha coevolución depende de la selección que hacen los componentes del sistema al aceptar o rechazar el intercambio de información y en adaptar su comportamiento de acuerdo con sus acciones reciprocas. Así, para que haya cambiose requiere de orden y flexibilidad, de acción y reacción.

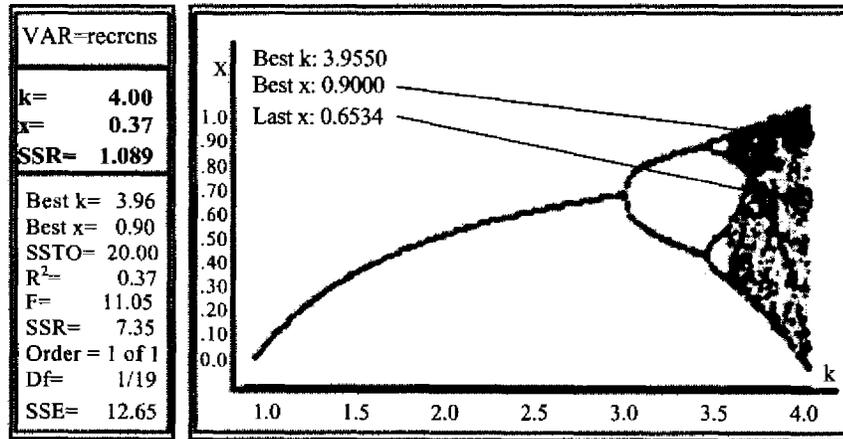


Figura 6.2: Regresión logística de la acción de organizaciones privadas en la recuperación y rehabilitación en el desastre sísmico de Ecuador 1987.

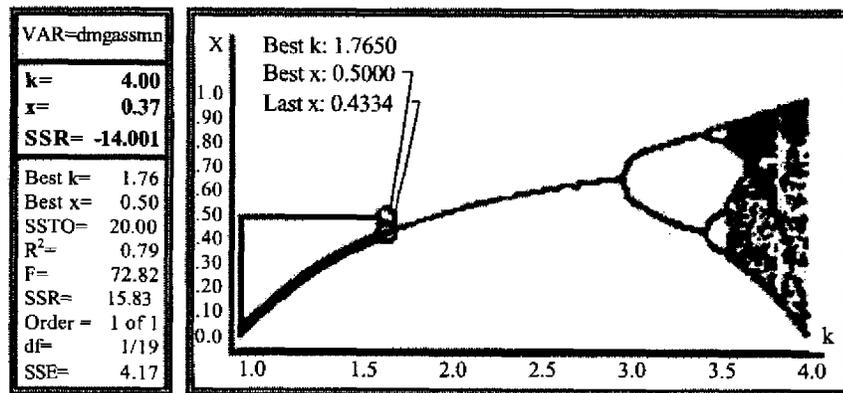


Figura 6.3: Regresión logística de la acción de instituciones públicas en la evaluación de daños en el desastre sísmico de Ecuador 1987.

Modelar en un sistema dinámico complejo no es buscar identificar una secuencia de relaciones causales que confiablemente produzcan unos resultados específicos. Mas bien, es identificar qué pasos se están dando a través de un espectro de muchos posibles cursos de acción y obstáculos, en un proceso en desarrollo que es guiado por una meta específica. En términos del método científico, el concepto de causalidad pasa a ser una abstracción de segundo orden en el estudio de sistemas no lineales. En este caso el

problema de política pública no es cómo lograr un resultado específico, sino más bien cómo generar y sostener un proceso de acción y consulta interactiva que, a través de su operación, conduzca a sus miembros a crear nuevas y más apropiadas estrategias y prácticas para responder a las necesidades de su ambiente.

El comportamiento adaptativo entre instituciones significa la capacidad de cambiar no sólo acciones sino prioridades para localizar recursos y atender las nuevas e inmediatas demandas que la crisis genera. Este cambio ocurre más eficientemente cuando las comunidades son capaces de “auto-organizarse”, es decir de reordenar sus prioridades y acciones de manera espontánea o sin la imposición de controles externos.

### **6.5 Técnicas para la modelización**

Para modelizar un sistema con fines de predicción o pronóstico existen diversas técnicas o herramientas. Tratándose de una representación del riesgo sísmico desde una perspectiva holística, algunas herramientas pueden ser más apropiadas que otras, debido al enfoque multidisciplinar y a la naturaleza de las variables que se desean involucrar. En particular cuando se trata de modelizar un sistema socio-técnico, como un asentamiento humano, el cual puede ser tan complejo como se quiera. Algunas herramientas que podrían ser utilizadas son la simulación (de la dinámica del sistema) y la evaluación multiobjetivo o multicriterio para la toma de decisiones, que puede estar basada en matrices de análisis de impacto o en redes de interrelación (Garret 1999).

En el primer caso, la estructura interna del sistema y de sus relaciones usualmente se mantienen fijas y el analista cambia ciertas condiciones, con el fin de estimar la respuesta del sistema cuando se procesa con unas condiciones específicas. La simulación puede ser determinista o estocástica, discreta o continua, lineal o no lineal, lo que hace en cada caso más complicado y eventualmente más confuso el proceso de la estimación de escenarios futuros. Su interés usualmente es identificar las causas subyacentes del comportamiento del sistema, aunque en algunas ocasiones se desarrolla con fines de predecir “futuros” con base en información histórica o para optimizar o identificar las mejores soluciones. Un ejemplo notable de este tipo de técnica, aplicada para la estimación de escenarios de potencial “sobrepasamiento”, crisis o “colapso” (estados del mundo), ha sido el modelo World3, desarrollado en M.I.T. por los hermanos Dennis y Donella Meadows, por solicitud del Club de Roma. Mediante este modelo tanto en los años 70 como, posteriormente, en los años 90, cuando se realizó la versión World3/91 en lenguaje de simulación STELLA, se ratificó que de seguir el actual crecimiento exponencial de la población, del capital, de la utilización de recursos y de la contaminación en el mundo será inevitable su colapso. (Meadows *et al.* 1974, 1994).

Ahora bien, la segunda posibilidad es la evaluación multicriterio, que también ha servido para representar situaciones o estados de sistemas dinámicos, complejos o no lineales. Puesto que este tipo de evaluación está basada en una racionalidad “constructiva” y permite tener en cuenta aspectos y efectos inciertos, inconmensurables, multidimensionales y conflictivos, es un marco de estimación prometedor para realizar evaluaciones integrales (macro y micro) y para la toma de decisiones en ambientes de múltiples variables (Munda 2000). Por ejemplo, la evaluación ambiental integrada (EIA), evaluaciones macroeconómicas, contabilidad verde o índices de sostenibilidad.

Este proceso se inicia con la identificación de variables imaginables que puedan “representar” o “reflejar” el estado de un sistema. Estas variables pueden no tener comparabilidad fuerte o conmensurabilidad. El análisis jerárquico o estructural de las variables (indicadores) es el paso siguiente. Consiste en determinar el impacto de cada variable en todas las demás o su influencia, con el objetivo de determinar su “peso” o importancia, para lo cual se conforman matrices de relaciones. Esta actividad se puede realizar teniendo en cuenta la opinión de expertos o de diversos actores sociales involucrados, si es necesario, utilizando el método Delphi (proceso de consenso y retroalimentación con el anonimato de los participantes). La evaluación multicriterio es una técnica para la toma de decisiones que permite involucrar diferentes perspectivas, por ejemplo la estimación del riesgo sísmico desde un punto de vista físico, económico, social, político, institucional, etc. Técnicas de evaluación multidisciplinar, como la mencionada, basadas en indicadores o índices han sido recomendadas recientemente por diversos especialistas con fines de reformular políticas públicas de prevención y reducción de riesgos (Maskrey *et al* 1998; Comfort *et al.* 1999; BID 2000; Benson 2001; Cannon 2001, Wisner 2000, 2001; UNDP 2001).

Por lo tanto, el autor optó aquí por utilizar la segunda técnica de las dos antes mencionadas, dado que no se pretende simular la dinámica del asentamiento humano y la manera como se desencadena un desastre a causa de un terremoto. El objetivo de la modelización es, más bien, estimar el estado del sistema dinámico antes de que ocurra el suceso, caracterizado por su inestabilidad o “vulnerabilidad” que lo puede llevar a la crisis. Dicho estado corresponde al riesgo sísmico del asentamiento humano, que puede interpretarse como un atractor hacia donde la dinámica del sistema esta orientada durante el tiempo anterior a la manifestación sísmica o como las condiciones iniciales de las cuales depende la respuesta del sistema en el momento que es perturbado.

La prevención o reducción del riesgo sísmico es la política pública que se desea estimular con la estimación holística del riesgo sísmico urbano. Se intenta identificar las circunstancias que favorecen o facilitan que el desastre sísmico se presente, con el fin de “anticiparse” y lograr que el sistema pueda adaptarse y disipar la influencia del fenómeno peligroso. El proceso de elaboración de una política pública, a diferencia de lo que muchos creen, esta muy ligado a la técnica de evaluación que se utilice para orientar dicha política (Corral 2000). La calidad de la técnica de evaluación, llamada por algunos su *pedigree* científico, tiene una influencia insospechada en la elaboración de la política. Si el diagnóstico, por ejemplo, invita a la acción es mucho más efectivo que si sus resultados se limitan a identificar la simple existencia de debilidades o falencias.

La calidad se entiende como la habilidad de un producto para satisfacer unos determinados requisitos o atributos deseables que, en este caso, debe tener la técnica de evaluación (Funlowicz y Ravetz 1990, 1992). Estos atributos son su “aplicabilidad”, “su transparencia”, su “presentación” y su “legitimidad”. Del cumplimiento de estos atributos o propiedades de la técnica de evaluación dependerá su *pedigree* científico.

La aplicabilidad está ligada a la adecuación del modelo al problema, a su alcance y completitud; a la accesibilidad, aptitud y fiabilidad de la información requerida. La transparencia esta relacionada con la estructuración del problema, la facilidad de uso, la flexibilidad y adaptabilidad, y con la inteligibilidad o comprensión del modelo o algoritmo. La presentación se relaciona con la transformación de la información, la visualización y comprensión de los resultados. Finalmente, la legitimidad esta ligada con

el papel del analista, el control y contrastación, la posibilidad de verificación y la aceptación y consenso de los evaluadores y tomadores de decisiones.

Para la modelización, el autor propone una representación simplificada pero multidisciplinar del riesgo sísmico urbano, basada en una “parametrización” de rasgos o variables que representen o reflejen aspectos o factores de dicho riesgo. Esta parametrización no es más que un modelo formulado de la manera más realista posible, al que continuamente se le podrán introducir correcciones o esquemas alternativos. Las técnicas metodológicas que se proponen para estimar el riesgo sísmico urbano –indicadores relativos y redes neuronales difusas– son modelizaciones simplificadas multicriterio con las cuales se intenta tener una aproximación de la situación de un sistema dinámico complejo (no lineal), como lo es el asentamiento humano. En su diseño se han intentado cubrir todos los requisitos o atributos de calidad mencionados previamente.

El enfoque para la estimación holística del riesgo sísmico que aquí se propone y se aplica en el capítulo siguiente puede suscitar alguna controversia desde una perspectiva reduccionista. Sin embargo, ante la complejidad del sistema socio-técnico que se desea representar para modelizar el riesgo sísmico urbano, el autor prefiere una respuesta “aproximada” a la correcta formulación del problema desde una perspectiva holística –que necesariamente se tiene que hacer con cierta vaguedad– que una respuesta exacta a la formulación “incorrecta” del problema, que de manera reduccionista y fragmentada podría realizarse con cierta precisión.