

## ENFOQUE SISTÉMICO DE PROBLEMAS AMBIENTALES RESTAURACIÓN DE EQUILIBRIOS DINÁMICOS EN ECOSISTEMAS DOMINADOS POR EL HOMBRE

Jorge G. Perera - Oscar J. Graieb – Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Ambiental, Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional - Rivadavia 1050 – 4000 - S. M. de Tucumán - Fax: 54 381 4217150

### RESUMEN

La toma de *decisiones político-económicas* en materia ambiental, debe apoyarse en el conocimiento científico, pues los hechos científicos y la evidencia, constituyen una guía para la acción de *restauración de equilibrios dinámicos* en los *ecosistemas dominados por el hombre*. Se requiere instrumentar *políticas ambientales*, cuyas acciones de *reparación ecológica* satisfagan los requerimientos inherentes al *sistema* sobre el que actúan, con el *mínimo insumo energético*, basado en criterios de optimización de la *exergía* como fracción de la *energía* aportada al *sistema* que se transforma en *trabajo útil*.

El *tratamiento sistémico* de problemas ambientales, se ilustra en este artículo, proponiendo un conjunto de elementos conceptuales y metodológicos, propios de la Teoría de la Complejidad, orientados a fundamentar un *manejo ecológico* de generación activa de estrategias encaminadas a lograr que el *sistema* funcione de manera sustentable.

### INTRODUCCIÓN

La unificación del conocimiento, importa la elaboración de *síntesis conceptuales* de amplio rango de explicación, con el surgimiento de interciencias y metateorías, cuyas innovaciones se incorporan a la actividad del pensamiento moderno en cada una de sus ramas. En el *positivismo*, afirma Charles Francois, cuyos escritos fundamentan este artículo, se limita el campo de las *ciencias fácticas* al *análisis de lo observable*; a los *hechos* y por lo tanto, a la *descripción*, a la *medida* y a la *conexión de los fenómenos*. Su objetivo es llegar, al descubrimiento de *leyes funcionales*, más o menos *generales* o *especiales*. La investigación de *explicaciones causales* circunscripta al *dato positivo* y a los *modos de existencia* que caracterizan los diversos *sustratos* en los que se expresan los *fenómenos*, conduce a dividir la realidad en un cierto número de territorios, más o menos separados, o dispuestos según planos superpuestos, los que corresponden a los dominios de las diversas *disciplinas científicas*. Resulta así excluida toda *investigación interdisciplinaria*, cuyo principio contradice el de las *fronteras consideradas naturales* que separan unas *categorías observables* de otras. El *positivismo* trata lo *social* con la metodología que aplica a los *hechos naturales* (*monismo positivista*), lo que implica un *reduccionismo mecanicista*, por asimilación no legítima de lo *social* a lo *natural*. Según el *mecanicismo*, todos los *fenómenos naturales* pueden ser reducidos al comportamiento de una *máquina*, donde cada parte está condicionada por las demás. Todo hecho es rigurosamente determinado por los otros y determina a su vez, los hechos posteriores. Sin embargo, en el terreno mecánico, surge el concepto de *adaptación*, asociado a los de *optimización* y *progreso* y en consecuencia, a la noción de la *finalidad* entendida como *causalidad lineal*, donde el *efecto* aparece antes que la *causa*.

El espíritu y la sociedad humana deben hallar su inteligibilidad en sí mismos. Surge frente al *monismo* que subsume lo *social* en lo *natural*, el *dualismo ontológico* de *naturaleza-cultura* y el *metodológico* de *explicación-comprensión*. En el mundo de la *cultura* emerge lo *intencional*, donde debe buscarse y comprenderse el sentido de la actividad humana. Un modelo teórico en *ciencias humanas* debe abarcar, no sólo la *causalidad material*; ésto es, los *aspectos externos del hecho*, la *explicación*, sino también la *comprensión* o *causalidad finalista*, aquello que apunta a lo *interno del hecho*, a lo *intencional*.

El *enfoque sistémico* no desmembra, no descompone, no reduce lo complejo a lo simple (*reduccionismo cartesiano*), sino que, permite ver la cosa en el juego de sus *interrelaciones*, de una manera concreta. La abstracción estaría en aislar la parte del todo. Lo concreto es el todo; se intenta complementar con visión *englobadora*, el conocimiento especializado y analítico, propio del pensamiento científico tradicional, el que distingue las *ciencias fácticas* de las *formales* en función de que las primeras recurren al *método inductivo*, mientras que las segundas se basan en la *deducción*. Toda *observación* implica una *partición* llevada a cabo por el *observador*, una *selección de elementos relevantes e irrelevantes* que participan o no en la *conceptualización* de la misma. Como construcción racional, el método de las ciencias fácticas pasa a ser interpretado como hipotético-deductivo, es propio de todo saber tanto natural como humano. La hipótesis constituye una selección de elementos relevantes a ser introducidos en la búsqueda del ordenamiento de los hechos y de sus relaciones. El *enfoque sistémico* como *modelo conceptual* o *paradigma* en la *etapa de formulación de hipótesis*, opera sobre los criterios de selección de *elementos relevantes*, ampliando el campo de significación, a fin de delimitar el *objeto de estudio* en función del *conjunto de interrelaciones* que mantiene con la totalidad de lo real y abordando intencionalmente, toda su *complejidad*.

El primer paso para abordar la *complejidad* es aceptar la *unidad* allí donde el análisis opera la *segmentación en partes*. El *enfoque sistémico* busca una unidad legítima, no subalternizando lo *social* a lo *natural*, ni aislando ambos campos, sino procurando determinar su *intersección*. El concepto comprometido en ello, es el de *estructuración de la realidad por niveles de complejidad creciente: físico, biológico y social*, donde cada *nivel* persiste en el siguiente y por lo tanto conservan validez sus leyes, pero en cada *nivel* surgen propiedades emergentes, propias de cada uno de ellos e irreducibles al *nivel inferior*. Esta *unidad* es entonces una *unidad en lo múltiple*, una imbricación de *interrelaciones*. Por el hecho de abordar de pleno esta multiplicidad es que la noción de *sistema* se acerca a la noción de *símbolo*.

La *Teoría General de Sistemas*, debida al biólogo austriaco Ludwig von Bertalanffy, demuestra la existencia de *isomorfismos* entre las *ciencias*. Reconoce que los *sistemas* no pueden ser plenamente comprendidos sólo por el análisis de cada una de sus partes. Se basa en la comprensión de la *dependencia recíproca* entre todas las *disciplinas* y en la necesidad de su integración e intenta restablecer la *coherencia del conocimiento*. Las tablas siguientes, establecen comparaciones entre el *enfoque clásico* y el *sistémico*:

Abordaje clásico:	Abordaje sistémico:
Aísla; se concentra sobre los elementos.	Relaciona; énfasis en las inter-relaciones entre elementos.
Se basa en la precisión de los detalles.	Se basa en la percepción global.
Independiente de la duración, los fenómenos son reversibles.	Integra duración e irreversibilidad.
La validación de los hechos se realiza por prueba experimental en el marco de una teoría.	La validación de los hechos, se realiza por comparación del funcionamiento del modelo con la realidad.
Eficaz cuando las interrelaciones son lineales y débiles.	Eficaz cuando las interrelaciones no son lineales y son fuertes.
Conocimiento de los detalles, objetivos mal definidos.	Conocimiento de los objetivos, detalles borrosos.
Visión estática:	Visión dinámica:
Sólido.	Fluido.
Fuerza.	Flujo.
Sistema cerrado.	Sistema abierto.
Causalidad lineal.	Causación circular; múltiple y recíproca.
Equilibrio de fuerzas.	Equilibrio de flujos.
Ejemplo: cristal.	Ejemplo: célula.
Previsibles; reproducibles; reversibles.	Poco previsibles; irreproducibles; irreversibles.

## DESARROLLO Y ASPECTOS TEÓRICOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS COMPLEJOS

Una premisa fundamental de la *Teoría General de Sistemas*, es la existencia de un *orden jerárquico* entre los *sistemas*; desde lo más simple hasta lo más complejo. Los *sistemas* se dividen en:

- **Abiertos:** cuando están en permanente relación con su *entorno*, intercambiando *materia* y *energía*. Éstas son empleadas en el *mantenimiento de la organización*, frente a la *degradación* provocada por el transcurso del *tiempo*. El *sistema* incrementa la *entropía del entorno*.
- **Cerrados:** cuando sólo intercambian *energía* con el *medio*; tienen un *comportamiento determinado y programado* o bien son *sistemas* completamente *estructurados*, donde los *elementos* se relacionan de manera rígida.
- **Aislados:** cuando no intercambian o interactúan con el mundo exterior. Este *sistema teórico*, emplea su reserva de *energía potencial interna*. A medida que las reacciones ocurren, se incrementa de modo irreversible la *entropía*. Al alcanzar el *equilibrio termodinámico*, la *entropía* es máxima y el *sistema* es incapaz de suministrar *trabajo*.

Según Bertalanffy, todo *estímulo* en cualquier unidad del *sistema* afecta todas las demás unidades. Otras características fundamentales para la comprensión de los *sistemas* son las que se refieren a *estabilidad*; *variedad*; *funcionamiento probabilístico*; *equifinalismo*; *entropía*; *información* y *retroalimentación*. En un *sistema* donde tiene lugar una transformación hay *ingresos* y *egresos*, los primeros resultan de la influencia del *entorno* sobre el *sistema* y los segundos de la acción del *sistema* sobre el *entorno*. En todo *bucle de retroalimentación*, las *informaciones* sobre los resultados son reenviadas a la *entrada del sistema* en forma de *datos*; si éstos contribuyen a facilitar y acelerar la transformación en el mismo sentido que los resultados precedentes, se trata de un *lazo de retroalimentación positiva*; sus efectos son acumulativos. Por el contrario, si los nuevos *datos* actúan en sentido opuesto a los resultados anteriores, se trata de un *bucle negativo*, sus efectos estabilizan el *sistema*. En el primer caso hay *crecimiento* o *decrecimiento exponencial*. En el segundo *mantenimiento del equilibrio*. Todo *sistema* presenta dos modos fundamentales de *existencia* y de *funcionamiento*: la *conservación* o el *cambio*. El primero merced a los *bucles de retroalimentación negativa*; se caracteriza por la *estabilidad*. El segundo depende de los *lazos positivos* que causan el *crecimiento* o el *decrecimiento*. De la existencia de ambos resulta toda la *dinámica de los sistemas abiertos*. La noción de *sistema* está estrechamente ligada a la de *observador*. El *observador* es quien define el *sistema* y hace esto, de acuerdo a sus propósitos. Un *sistema* es una *entidad separada del entorno* por una operación de distinción. Variando los límites de distinción y/o el nivel de resolución, se define el *sistema* o bien el conjunto de entidades: *suprasistema-entorno-sistema-subsistema-elemento*. Los *componentes* de un *sistema* establecen *relaciones* entre ellos y con los *elementos del entorno*; las *relaciones* son *flujos de intercambio de energía, materia e información*. El *entorno* impone al *sistema* un límite. El *sistema* gana en organización incorporando del *entorno, masa, energía e información*, que le permiten ampliar su *límite* hasta que un nuevo *límite* aparece.

## TERMODINÁMICA Y AMBIENTE

El *Primer Principio de la Termodinámica* o de *conservación de la energía* establece que la *cantidad total de la energía* en el *Universo* permanece *constante*. La *energía* no puede ser creada ni destruida. El *Segundo Principio de la Termodinámica* o de *degradación de la energía* establece que la calidad de esta *energía* se degrada de manera *irreversible*. En un *sistema aislado* cualquier cambio espontáneo va acompañado de un aumento de *entropía*. La *entropía* del *Universo* no se conserva constante; siempre crece. La *energía mecánica, química o eléctrica* puede transformarse íntegramente en *calor*. Pero la transformación inversa, de *calor* en *trabajo mecánico*, por ejemplo, no puede hacerse íntegramente sin aportación exterior y sin pérdida de *calor* irrecuperable: ello no quiere decir que la *energía* se destruya, significa que queda *indisponible* para realizar *trabajo*. La *entropía* mide cuanta *información* hace falta para comprender el *orden de un sistema* que parece desordenado. Es así, una *medida de la incertidumbre*.

El tipo de *equilibrio* que alcanza un *sistema* y el modo de mantenerlo, dependen en gran medida de su relación con el *medio*, según sea el *sistema*, *abierto*, *cerrado* o *aislado*. Cada *desequilibrio* origina una *fuerza*, cada *fuerza* origina un *flujo* y cada *flujo* tiende a *equilibrar* el *sistema*. Para *gradientes pequeños*, en situaciones cercanas al *equilibrio*, la *relación* entre *flujos* y *fuerzas conjugadas* es *lineal*. Para *gradientes grandes*, en situaciones alejadas del *equilibrio*, la *relación* pasa a ser *no lineal*; este caso es de interés en relación con los *sistemas complejos*.

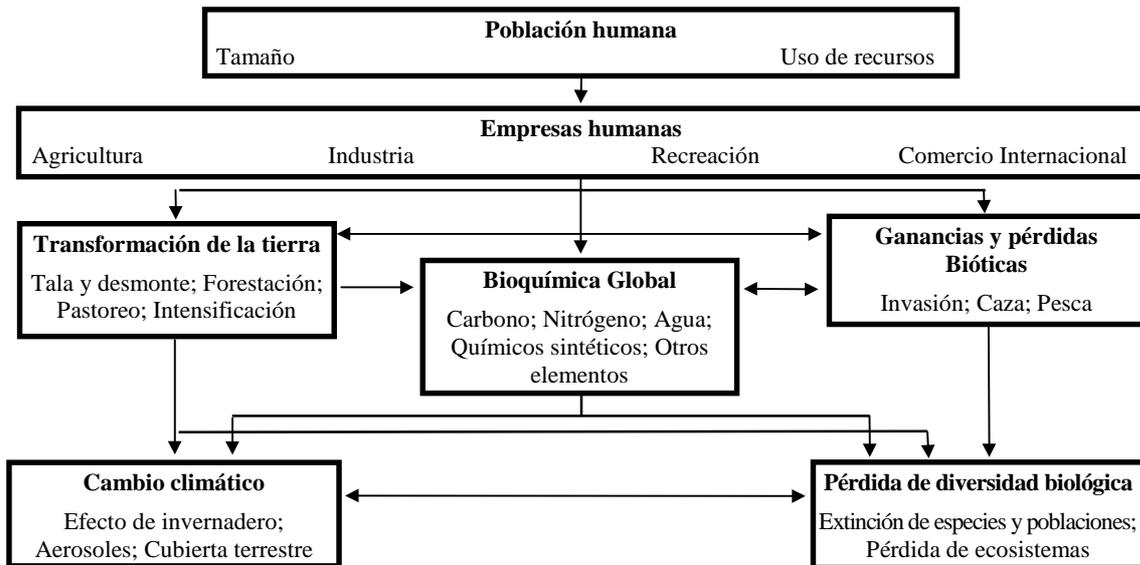
El *sistema* tiende a adoptar el *estado* que le permite producir un *mínimo de entropía* por *unidad de tiempo*. En realidad, la transición a un nuevo *estado* no es más que el abandono de una *estructura* que, para la situación o las condiciones imperantes, disiparía demasiada *entropía* o más exactamente, gastaría demasiada *energía libre*. Un *sistema* en crecimiento posee una *estructura inicial* que constituye una *fluctuación* con respecto a su estado adulto. Los *sistemas complejos* utilizan *procesos no lineales* para aumentar su *disipación* al *tiempo* que forman *estructuras disipativas espacio-temporales* en los primeros pasos a través de una *sucesión de inestabilidades*. Sólo una vez que dicha fase se ha superado se encara una *evolución* hacia un *estado estacionario* que se caracteriza por un *mínimo de producción de entropía*. Pueden concebirse *estructuras en equilibrio*; *cerca del equilibrio* y *alejadas de él*. Una gran diferencia separa los dos primeros estados del tercero. En los primeros, los *flujos* gobiernan las *fluctuaciones*. Lejos del *equilibrio* son las *fluctuaciones* quienes inducen nuevas *estructuras* amplificándolas y arrastrando al *sistema*; rige el *principio de orden por fluctuaciones*. La diferencia que separa ambos principios puede resumirse cualitativamente en la propiedad siguiente: en la proximidad del *equilibrio* un *sistema* se ajusta lo más próximo al *equilibrio*. Lejos del *equilibrio* un *sistema* se reorganiza mediante la *amplificación* y posterior *estabilización de fluctuaciones* en presencia de los intensos *flujos de materia y energía* que el *ambiente* impone. *Adaptación* en un caso, *reestructuración* en el otro.

Si se imagina un *sistema intermediario* entre una *fuerza de energía* y un *sumidero* se observa que el *sistema intermediario* está atravesado así, por un *flujo de energía*. La *entropía* de un *sistema* sometido a un *flujo de energía* puede decrecer. En otros términos, la *energía* que atraviesa el *sistema* es utilizada para producir un *trabajo* necesario para el mantenimiento del *estado alejado del equilibrio*. El *trabajo* realizado en el *sistema intermediario* va asociado al *flujo de energía* existente entre la *fuerza* y el *sumidero* y en lo que respecta al *sistema* en su conjunto (*sistema intermediario más medio*), la producción de *entropía* es positiva. La existencia del *sistema* depende de un aumento continuo de la *entropía* del *medio* circundante. El gasto de *energía libre* en el *medio* es mayor que la almacenada por el *sistema*. La desorganización del *medio* es también proporcionalmente mayor que la organización que gana el *sistema*. El *Tercer Principio* es aplicable sin más a los *sistemas abiertos*. Llamado el *principio de la máxima potencia*, explica porqué algunos *sistemas* sobreviven; el *sistema* que sobrevive es el que recibe más *energía* y la emplea con más *efectividad* y *eficiencia* en la competencia con otros *sistemas*, maximizando la *exergía*.

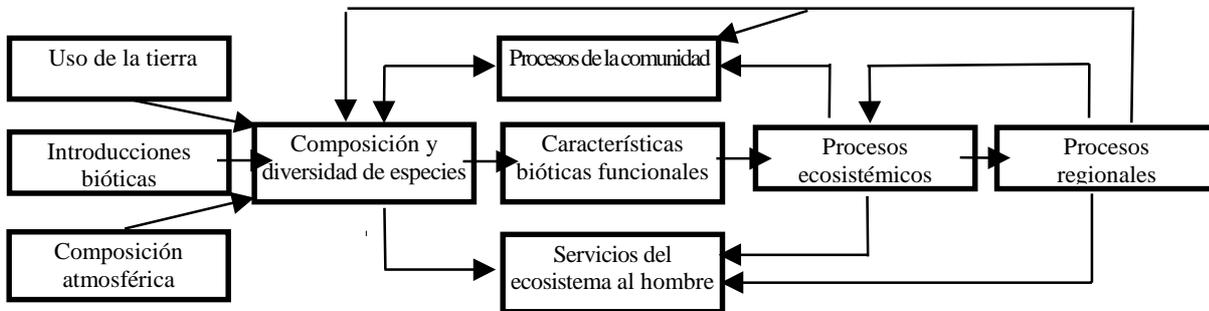
Cuando un *sistema* es *alejado del equilibrio*, su regreso a él puede cumplirse, al menos en parte, por otro camino. Esto da origen a un *ciclo*. Está demostrado que el *flujo de energía* desde una *fuerza* a un *sumidero* a través de un *sistema* en *estado estacionario* origina, por lo menos, un *ciclo material* en el *sistema*. En el *proceso* entra *energía* continuamente y sale como *energía calorífica degradada* e *inútil*. Los *ciclos* al funcionar almacenan *energía* y sus modelos de organización son tales que estabilizan el *flujo de energía* haciendo posible que la vida de la biosfera continúe armoniosamente. Un *sistema complejo* se caracteriza por su capacidad para adaptarse a las *fluctuaciones* que le impone el *entorno* gracias a la *variedad de estados* que puede adoptar como respuestas posibles ante dichas *perturbaciones*. Un *sistema organizado* no puede adoptar cualquier *estado*. Si así fuera, se comportaría como un *conjunto desorganizado* y consiguientemente, no sería un *sistema*. En toda organización existen ciertas *restricciones* que alejan la posibilidad de que el *sistema* llegue a adoptar *estados* no deseables para su *estabilidad-supervivencia*. Las *restricciones* reducen la *variedad del sistema* como *complejidad organizada*. Un *sistema autorregulado* no deja de estar sujeto a *restricciones*. El hecho fundamental es que cada *restricción* en particular está sujeta por su parte al conjunto de *restricciones* que determinan el funcionamiento global del *sistema*. Se necesita *energía* para obtener *información*, e *información* para manejar la *energía*. Un *sistema complejo* es capaz de *adaptarse* y *evolucionar*. La habilidad para sobrevivir mejor dependerá de la capacidad de *variar* y *diversificar* el conjunto de comportamientos que conducen a la supervivencia. Los *sistemas* tienden a la *complejidad* aumentando el número de *interconexiones* entre sus *elementos* y *ganando en variedad*.

El *Enfoque Sistémico de Problemas Ambientales*, se ilustra con una propuesta de restauración de *equilibrios dinámicos* en *Ecosistemas Dominados por el Hombre*. Las acciones a encarar, deben satisfacer los requerimientos inherentes al sistema sobre el que actúan, con el *mínimo insumo energético*, compatible con las condiciones *económico-tecnológicas* imperantes. La Fig. 1, constituye un *modelo conceptual* que ilustra los *efectos directos* e *indirectos* del Hombre sobre la *ecósfera*. Los *cambios* en la *abundancia de especies*; particularmente aquellos que influyen la *dinámica del agua* y los *nutrientes*; las *interacciones tróficas* o bien, los que alteran las *condiciones de régimen*, afectan la *estructura y funcionamiento de los ecosistemas*. La *biodiversidad* incrementa la *probabilidad de participación de especies* con *efectos positivos* sobre el *ecosistema* y aumento en la *eficiencia* en el uso de recursos. Las diferencias en términos de *sensibilidad ambiental* entre *especies funcionalmente similares*, brindan *estabilidad* a los *procesos ecosistémicos*; contrariamente las diferencias en sensibilidad entre *especies funcionalmente diferentes*, hacen al *ecosistema* más *vulnerable al cambio*. Los *cambios ambientales* afectan la *composición de especies* y la *diversidad*, alterando el funcionamiento de la biosfera.

El esquema siguiente (Fig. 2) ilustra sobre los vínculos entre *composición específica*, *diversidad* y *procesos ecosistémicos*; éstos incluyen aspectos vinculados con la *productividad* y el *ciclo de nutrientes*. En *escala regional*, deben contemplarse los *flujos gaseosos* hacia la *atmósfera* y los de *nutrientes* desde los *sistemas terrestres* a los *acuáticos*. Las *interacciones* que tienen lugar entre *comunidades*, comprenden la *competencia* y la *depredación*. Los *servicios del ecosistema* están asociados con los beneficios obtenidos por el Hombre, a partir de los *procesos ecológicos*. La *expansión* y la *intensificación* de las *áreas de cultivo* se ubican entre los *cambios globales* predominantes del presente siglo. La *agricultura* se ha hecho *intensiva* mediante el uso de *variedades* y *cultivares* de alto rendimiento, exigentes en *insumos* tales como *fertilización*, *irrigación* y *plaguicidas*. Estas prácticas han contribuido substancialmente al aumento de la producción de alimentos durante los últimos 50 años.



**Fig. 1 - Modelo conceptual que ilustra los efectos directos e indirectos del Hombre sobre la ecósfera.** Cabe observar que todo cambio en el uso o destino del suelo o la intensificación de las prácticas agrícolas, altera las interacciones bióticas y los patrones de disponibilidad de recursos en el ecosistema, con consecuencias ambientales, en escala local, regional o global.



**Fig. 2 - Enlaces vinculando composición y diversidad específica y procesos ecosistémicos** Los procesos regionales comprenden los flujos de gases hacia la atmósfera y el transporte de nutrientes desde los sistemas terrestres hacia los acuáticos. Los procesos comunitarios, involucran la competencia y la depredación. Los servicios del ecosistema al Hombre, son los beneficios que la especie humana deriva de los procesos ecológicos.

## CONCLUSIONES

Como se expresó, la exergía, como entidad termodinámica, se interpreta como fracción de la energía aportada al sistema que se transforma en trabajo útil; por consiguiente, la determinación de la eficiencia de uso de la energía, cuando se realizan tareas de restauración o remediación ambiental, puede ser encarada mediante procedimientos que evalúen el trabajo requerido para operar la restitución del sistema a una situación de productividad sostenible. La noción de complejidad de un ecosistema, está asociada a la variedad de los elementos que lo constituyen; a las interacciones lineales y no lineales y a la totalidad organizada. Cuanto más complejo es un ecosistema, más debe serlo el sistema de control, a fin de ofrecer respuestas a las múltiples perturbaciones provenientes del contexto. Esto determina que la regulación para ser eficaz, debe apoyarse en un sistema de control de complejidad equivalente a la del ecosistema sobre el que actúa. Se necesita que las acciones de control sean de una variedad igual a la del sistema controlado. Un sistema de control ambiental, es un ordenamiento de componentes físicos, vinculados o relacionados de tal manera que mandan, dirigen o regulan dinámicamente al mismo ecosistema o a otro. Tal como se expresó previamente, los diseños de lazo cerrado, se caracterizan por la retroalimentación que permite que la salida se compare con la entrada o referencia, de modo que la acción de control ambiental apropiada pueda definirse como alguna función de la entrada y de la salida del ecosistema; existe pues, una secuencia cerrada de relaciones causa y efecto entre las variables del sistema natural-social.

## BIBLIOGRAFÍA

- BECKER, HENK A. and ALAN L. PORTER. 1986 IMPACT ASSESSMENT TODAY. Volume I and Volume II. Utrecht, The Netherlands; Uitgeverij Jan van Arkel. 857 págs..
- CHAPIN, F. STUART *et al.* BIOTIC CONTROL OVER THE FUNCTIONING OF ECOSYSTEMS - Science, Vol.277, 25 July 1997, pages: 500-504.
- ERICKSON, PAUL A.. 1994. A PRACTICAL GUIDE TO ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT. San Diego, Ca (USA); Academic Press. 266 págs..
- MARTÍNEZ ALIER, J. and K. SCHLÜPMANN. 1994. ECOLOGICAL ECONOMICS - ENERGY, ENVIRONMENT AND SOCIETY. Oxford (UK) & Cambridge (USA). Blackwell Publishers. 287 págs..
- RAMAGE, J.. 1983. ENERGY - A GUIDEBOOK. (An Opus Book). Oxford (UK). Oxford University Press. 345 págs..