

## RESEÑA GENERAL SOBRE LA INVESTIGACIÓN SISTÉMICA DEL MEDIO NATURAL

Por *Jorge F. Cervantes Borja\**

### RESUMEN

Este trabajo hace una reseña sobre las nuevas formas conceptuales de la investigación integral del medio natural, surgidas tanto en el campo de las geociencias como de las ecociencias. Además, integra y correlaciona los métodos sistémicos estableciendo una crítica sobre el análisis de sistemas y su uso en la investigación del medio natural.

### SUMMARY

This paper describes the new conceptual forms of integral environmental research, development in the Geoscience and Ecoscience field. Furthermore, to do a critic and correlation the systemic method and his use in Geomorphology and environmental Science.

### 1.0 INTRODUCCIÓN

La investigación del medio natural que pretenda llegar a obtener bases óptimas y adecuadas para el uso y manejo del mismo, debe basarse en el conocimiento de los componentes y elementos que forman su estructura estática y dinámica, que debemos conceptualizar funcionalmente como un sistema integral.

Aunque no siempre es posible utilizar los mismos métodos de análisis en cada unidad, la idea es que los mismos sean empleados de tal modo que el resultado permita invariablemente identificar la funcionalidad de cada parte operativa y del conjunto en general. Los factores y elementos analizados deben, por ello, identificarse como aquellos que son clave en el funcionamiento, mantenimiento y control del sis-

tema natural rector, como un paso necesario para la planeación de su uso y manejo a conveniencia propia. Desgraciadamente este primer paso básico se ha soslayado y, así, es común que se use y maneje un sistema del que se desconoce su operación, siendo este uso a ciegas el que provoca la pérdida de recursos reales y potenciales, además de los riesgos y desastres que ocasiona a la biota y al mismo género humano; todo lo cual podría preverse si se conociera de antemano el tipo y grado de desequilibrio que se causaría al funcionamiento integral de un sistema. Por tanto, es de gran importancia el conocimiento de los factores clave de los sistemas del medio natural, puesto que son ellos los que constituyen los eslabones que integran y rigen el funcionamiento de toda la estructura operativa.

La necesidad de encontrar mejores soluciones a la problemática que presenta el uso, des-

\* Investigador del Instituto de Geografía de la UNAM.

arrollo y conservación de los medios naturales como bases de sustento, de asentamiento y de disfrute humano, han propiciado un replanteamiento de los métodos tradicionales de investigación de los mismos.

Así, hasta ahora, cada elemento del medio natural se analiza como un factor aislado; las disciplinas se han desarrollado más en función de técnicas de especialización que de síntesis e integración. Ello ha motivado una profusión de especialidades que pretenden, bajo enfoques unilaterales, solucionar la problemática. Ante la divergencia de criterios se hizo imperativo el cambio a una metodología de integración sistemática y funcional.

Es claro que hasta ahora la crisis del medio natural o ambiental, como la llaman algunos, está ligada tanto a una inadecuada formulación del sistema económico-social, como al del carácter utilitario que se ha dado a la ciencia, para promover cambios profundos en las condiciones naturales. Todo lo cual se puede corregir si se adicionan a las bases de los métodos científicos uniones que promuevan ligas funcionales de integración y coordinación interdisciplinaria. Esto es lo que trata de llevarse a cabo hoy día tanto en el campo de las ciencias de la tierra como en el de la ecología, sin que ello signifique que haya que formar y colocar por todas partes a geocientíficos o a ecólogos, tal como muchos lo creen debido al auge publicitario de la ciencia ecológica; así como tampoco se trata de transformar la enseñanza y orientarla a la temática de la crisis ambiental, ya que lo único que se requiere en este nuevo tratamiento es el apoyo de un número limitado de generalistas o, por así decirlo, ejecutivos que comprendan la diagnosis del especialista, y bajo un criterio generalizado y sintético coordinen con una función integral la solución de la problemática. A continuación presentamos una breve reseña sobre los cambios más significativos ocurridos en el campo de las geociencias y en el de la ecología, para adecuar sus métodos al tratamiento integral del medio natural.

## 2.0 NUEVOS CONCEPTOS PARA EL ESTUDIO INTEGRAL DEL MEDIO NATURAL

El inusitado y justificado interés que se ha dado a la preservación y conservación del medio

ambiente natural ha dado lugar al surgimiento de una nueva disciplina, la "geociencia ambiental" (1). Los componentes de esta disciplina no son nuevos, pues son el resultado o forman parte de métodos biológicos, físicos, químicos y de las geociencias.

La geociencia ambiental estudia todos los sistemas del aire, el agua, la tierra, la energía y la vida que rodea al hombre. Como se ve, esta disciplina propende a la integración continua de conceptos científicos obtenidos de disciplinas como la meteorología, la geofísica, la oceanografía, la ecología, etc., y emplea herramientas metodológicas de ciencias físicas, químicas, biológicas y matemáticas.

Ahora bien, lo nuevo en la geociencia ambiental es el concepto analítico de visualizar los problemas en forma global, concibiendo a la Tierra como un conjunto de sistemas interactuantes y, en su concepto fundamental, al hombre como una parte de esos sistemas.

Los objetivos que se persiguen pueden centrarse en la necesidad fundamental de definir los patrones de funcionamiento que rigen los sistemas naturales, a fin de modificarlos con alta eficiencia y, con ello, dar soluciones prácticas y apropiadas a los problemas que se presentan y alteran el funcionamiento y mantenimiento de las partes del mismo, tales como: los recursos naturales (agua, madera, pesca, etc.); la conservación de los no renovables (combustibles, metales, especies bióticas); alivio contra efectos provocados por los desastres naturales (temblores, tornados, ciclones, inundaciones); reducción de males crónicos (erosión, sequía, etc.); abatimiento de la contaminación humana (humos, pesticidas, aguas negras, etc.); y defensas ante la contaminación natural (polvo volcánico, ruido electromagnético, tormentas de arena, plagas, etc.)

La interacción hombre medio implica dos acciones: las que se producen por efecto exclusivo de fuerzas físicas, que incluiremos en el campo de la *geociencia*, y las que implican directamente a los seres vivos y que forman el campo de la *ecociencia*.

Ambos aspectos, geociencia y ecociencia son elementos "interdependientes que deben tener objetivos complementarios más que suplementarios", y ello es lo que intenta lograr la geo-

<sup>1</sup> Stralher, A. N. y Stralher, A. H., *Environmental Geoscience*, Hamilton Publishing, Co. U.S.A. 1973, p. 1.

ciencia ambiental. Por tal razón, especialistas en geociencia o ecociencia deberán trabajar en forma conjunta a fin de obtener una capacidad objetiva de integración multidisciplinaria.

Dentro del campo de las geociencias existen dos sentidos de tratamiento básicos: uno considera el impacto que las fuerzas naturales del medio provocan entre sí y en el hombre (inundaciones, temblores, huracanes, deslizamientos, etc.) y, el otro, el impacto que el hombre produce sobre el medio ambiente (contaminación del aire y el agua, erosión del suelo, modificación a la red fluvial, uso de los recursos naturales renovables y no renovables, etc.).

Dentro del campo de las ecociencias también se consideran dos aspectos básicos: por un lado, la estructura y función de los organismos como partes del sistema, y, por el otro, la forma como se distribuyen la energía y la materia en el sistema, a fin de optimizar su aprovechamiento. Así, el consumo de recursos naturales renovables y no renovables, especialmente minerales y combustibles fósiles, es una parte integral en el objetivo de la ciencia ambiental. La extracción, proceso y consumo de estos recursos lleva aparejada una larga cadena de problemas de contaminación y degradación del ambiente. Consecuentemente, es fundamental considerarlos dentro de la problemática general del sistema geoecológico.

## 2.1 El Método

A partir de la década de los cuarenta, y como una necesidad de contar con una metodología rápida y eficiente para solucionar y visualizar a nivel ejecutivo los complejos problemas tácticos, políticos, sociales, etc., surgidos con motivo de la Segunda Guerra Mundial, se incrementó el desarrollo tecnológico y filosófico de la teoría general de sistemas (2).

Dicha teoría general, en el sentido más estricto del término, trata de las propiedades y leyes generales de los sistemas. Un sistema puede ser definido, entre otras formas, como un conjunto de componentes en estado de interacción, que rige una función (3).

<sup>2</sup> Jramoi, V. A. *Introducción e Historia de la Cibernética*. Edit. Grijalbo, Colección 70, México, 1969, p. 82-90.

<sup>3</sup> Bertalanffy, L. V. *Robots, Hombres y Mentes*, Edit. Guadarrama, Madrid, España, 1971. p. 102-124.

Tal teoría busca desarrollar los principios aplicables a los sistemas en general, prescindiendo de la naturaleza de éstos, de sus partes componentes y de las relaciones o fuerzas entre ellas.

Entre las características de los sistemas encontramos interacciones multivariadas, conservación del todo en la acción recíproca de las partes componentes, organización por niveles que lleva a sistemas de orden superior, diferenciación, centralización y mecanización progresiva, a fin de encontrar una causalidad directora y actuadora que permita, por diversos procedimientos, la regulación y orientación hacia el objetivo teleológico.

En contraste con la creciente y necesaria especialización actual de la ciencia moderna, este método permite una nueva forma de integración y organización conceptual del conocimiento.

Es posible distinguir dos tendencias básicas en el desarrollo de la ciencia de los sistemas, que pueden ser denominadas mecanicista y organicista.

La tendencia mecanicista se relaciona con las innovaciones tecnológicas, industriales y sociales tales como: las técnicas de control, la automatización, la aplicación de la computación, etc., todas ellas surgidas en la teoría de la cibernética.

Por otra parte, la tendencia organicista implica, esencialmente, la búsqueda de los principios y leyes que rigen la organización, integridad, ordenamiento de partes y procesos, interacción multivariable, etc. de un sistema; con todo lo cual se crea la teoría general de los sistemas.

Con cierta frecuencia se confunden ambas tendencias, pero esto es un error que necesita corregirse. Los conceptos básicos de la cibernética son la realimentación y la información. Los elementos mínimos de un sistema cibernético son: un receptor que recoja como información los estímulos externos; entonces transmite un mensaje a un centro motor que reacciona ante él y condiciona a un actuador que, en su momento, reacciona al estímulo con una respuesta informativa, misma que es transmitida por un circuito de realimentación al receptor que percibe la respuesta preliminar y gobierna la subsecuente actuación. Este tipo de modelo se encuentra en el conocido termostato que gobierna un sistema de calefacción;

la información es el descenso térmico que registra el receptor (termostato) y éste rige un centro actuador (calefactor) que determina un incremento continuo de la temperatura hasta que ésta alcanza el grado preestablecido. Como es bien sabido, este modelo cibernético se ha aplicado a una extensa variedad de regulaciones de modelos físicos y biológicos que pueden ser descritos en términos de circuitos de realimentación. Evidentemente, el modelo cibernético es mecanicista porque supone la existencia de un ordenamiento de estructura precontrolada, tal como queda indicado más arriba. En contraste con ello, el modelo cinético de la teoría organicista no es mecanicista, dado que sus controles reguladores no están determinados por elementos de su estructura, sino por la interacción de las fuerzas que operan entre ellas. Dicho en términos epistemológicos: aunque el prototipo de procesos físicos no dirigidos, en estos sistemas es la causalidad lineal (la causa "a" es seguida por el efecto "b"), en el modelo cibernético ello trae consigo la causalidad circular con el circuito de realimentación negativa que determina la autorregulación (homeostasis) del sistema. En contraste, en el modelo cinético es la interacción dinámica entre las variantes la que determina la autorregulación dinámica que actúa en principio con un sistema de realimentación negativa, y termina siempre con una realimentación positiva; siendo esto último lo que origina que el sistema sea autoevolutivo. En consecuencia, los modelos cibernéticos se aplican particularmente a regulaciones secundarias, mientras que los modelos "cinéticos" son necesarios para las regulaciones primarias. Esto es, los sistemas cibernéticos son cerrados con respecto al intercambio de materia con el ambiente, y solamente están abiertos a la información, por lo cual dichos sistemas no pueden ser autoorganizadores; es decir, no pueden evolucionar de un estado a otro y, por tanto, no pueden desarrollar procesos de diferenciación funcional basados en el suministro y consumo de energía y materia; dicho de otra manera, los sistemas cibernéticos solamente pueden aumentar en cuanto a su contenido entrópico y disminuir en cuanto al informativo; a diferencia del modelo que debe abarcar la interacción dinámica de muchas variantes, la conservación del todo en el cambio de los elementos componentes, el crecimiento, la diferenciación progresiva, la mecanización y

la centralización, el aumento del nivel de organización y los fenómenos rectores de la autoevolución.

## 2.2 Aplicaciones de la Teoría de Sistemas

En la actualidad, la teoría de sistemas se considera como una herramienta universal susceptible de ser utilizada en cualquier campo de estudio y en todos los niveles. En su metodología se implican conceptos económicos, sociales, técnicos, políticos, científicos etc. Todos ellos llevados a planos objetivos (modelos físicos) o subjetivos (modelos matemáticos) de operación, con la ventaja de que se pueden analizar en su relación interior o intraespecífica.

El significado exacto del análisis de sistemas, teoría de sistemas, ciencia de sistemas, ingeniería de sistemas e investigación de operaciones, es diferente para diversas personas según la relación y el objetivo que tengan o persigan de él; sin embargo, estas diferencias semánticas, técnicas o filosóficas no son más que una consecuencia de la misma naturaleza interdisciplinaria que la anima; por eso se considera imperiosa la necesidad de hacer uso de toda metodología en un marco cada vez más objetivo y científico, efectuando una simbiosis metodológica que se identifique con la cualidad de los problemas hacia los que está dirigida. El uso de este medio tiende a llevar los factores cualitativos a un plano de análisis homogéneo en el que todas las etapas del conocimiento funcional de los componentes tengan el valor intrínseco que mantienen en el conjunto.

Tradicionalmente muchas disciplinas han utilizado modelos físicos para sistematizar sus experimentos de laboratorio, de manera que se tenga una muestra objetiva de su funcionamiento, de sus requerimientos y necesidades, etc. Sin embargo, la construcción de modelos físicos de sistemas complejos, tales como la organización de la infraestructura total de un país, resultaría demasiado costosa y difícil de representar; es entonces cuando la ayuda de modelos matemáticos más sencillos, realistas y flexibles substituyen a aquéllos y dan la pauta para hacer más fácil lo complejo.

Este último problema, el de tratar de comprender en forma fácil la complejidad del mundo real, ha hecho necesario el uso de "modelos" o artificios por los que intentamos repre-

sentar la realidad. Desde el punto de vista lingüístico, los modelos tienen diferente significado: usados como sustantivo indican representatividad; como adjetivo realización y como verbo demostración.

En la ciencia están implicados los tres significados, de manera que un objeto modelo constituye una representación idealizada de la realidad, por lo cual tratamos de entender sus propiedades (4). Cuando a dicho objeto le adjudicamos una serie de atributos que representan la base conceptual de nuestros conocimientos sobre la materia, lo transformamos en un modelo teórico que pasa a ser la herramienta que simplifica la certificación razonada de las hipótesis. Existen, en sentido general, tres tipos de modelos que representan tres estados de abstracción, y son:

*Modelos icónicos*, los que sin cambiar las propiedades de la materia la representan a una escala mayor o menor de la realidad, por ejemplo: una carta topográfica.

*Modelos analógicos*, en ellos las propiedades de los objetos reales se representan a través de las propiedades similares de otros objetos reales, por ejemplo: la representación del flujo de energía de un ecosistema por un circuito electrónico.

*Modelos simbólicos*, en ellos las propiedades del mundo real se representan por símbolos, por ejemplo: la integración de ciertas propiedades de un sistema hidrológico por una función matemática.

La elaboración y uso de modelos ha sido una gran ayuda para la investigación, y aunque no existe un lineamiento general para construir modelos, ello depende de las necesidades, de los objetivos, de la capacidad de síntesis, de la intuición de la problemática general, de la imaginación analógica, de la experiencia y conocimiento profundo de los problemas, de la intuición de los resultados, etc. Según Cárdenas (5), se pueden delinear tres conceptos fundamentales en la formulación de modelos:

1. Es necesario considerar que la construcción de modelos es un proceso adaptativo-

<sup>4</sup> Bunge, Mario, *Teoría y Realidad*, Editorial Ariel, Barcelona, 1972, p. 9-86.

<sup>5</sup> Cárdenas, M. A., 1973. "El concepto general de la Ingeniería de Sistemas". *Rev. Recursos Hidráulicos*, Vol. 11 No. 4, México. p. 537-542.

evolutivo que parte de lo simple a lo complejo.

2. Siempre es benéfico establecer analogías con estructuras lógicas de modelos sistematizados y desarrollados en otros campos, a fin de identificar un proceso evolutivo complejo.
3. Se tiene siempre que considerar que los modelos constituyen pruebas lógicas cuyo funcionamiento es susceptible de ser evaluado por etapas o en conjunto, a fin de lograr la optimización de su operación.

El análisis de sistemas es, por tanto, una metodología que se aplica al análisis de los diferentes componentes de un sistema a fin de detectar, evaluar, solucionar y mejorar su operación conjunta; es por esto que el análisis de sistemas constituye una herramienta básica y directa que ayuda a la toma de decisiones, con una base estrictamente sistémica o matemática que implica, también, una jerarquización numérica de los aspectos considerados como cualitativos.

En conclusión, el análisis de sistemas no pretende reemplazar las filosofías y técnicas particulares de las disciplinas que requieran de él, sino, por el contrario, trata de dar un apoyo lógico y eficaz para facilitar al máximo la evaluación operativa y la toma de decisiones en la solución de su problemática.

Actualmente, este tipo de estudios analíticos auxilia a la planeación y a la operación de los sectores de finanzas, industrias, comercio, administración pública, etc. Sin embargo, el objetivo de esta reseña se refiere al desarrollo que dicha tecnología ha tenido en el campo de las ciencias naturales, ya definidas como "geociencia ambiental".

De acuerdo con lo expuesto en la introducción, la condición dinámica y compleja del medio ambiente y de los organismos que en él se encuentran son dos razones para considerar al medio como un sistema multivariable del que es necesario describir e identificar sus partes y analizar la operación del conjunto que forman los subsistemas naturales, con el objeto de llegar a comprender perfectamente la evolución en el tiempo y en el espacio de los ecosistemas, biomas y de la misma tierra vista en conjunto.

Particularmente hemos de tomar en cuenta el tipo de metodología que analiza el compor-

tamiento de la materia en función del flujo energético que recibe; es decir, un tipo de metodología que parte siempre de la causa primaria que mueve a un sistema, la energía. Esta forma de encarar el análisis de sistemas naturales se empezó a desarrollar en la década pasada, en varios países del mundo, pero especialmente en los Estados Unidos (6).

Los estudios que se elaboran basados en el análisis de los flujos energéticos que ocurren en la trama de un sistema natural o humano, sugieren una forma más fácil, cómoda y eficiente para determinar y solucionar los aspectos que alteran el funcionamiento del conjunto o cualquiera de sus componentes, lo que permite cumplir, en forma óptima, con los objetivos básicos, o sea el conocimiento absoluto de todos los procesos interactuantes en los sistemas naturales.

Los problemas que afectan un sistema, por complejos que sean, cuando son considerados en términos de energía se reducen al análisis de unos cuantos parámetros. Esta forma de encarar las situaciones puede aplicarse a todos los niveles especiales, con cualquier grado de organización y en cualquier tiempo, con lo que se sustenta un análisis que ayuda a contestar muchas incógnitas en el campo de las geociencias y de la ecociencia.

La metodología así esbozada actúa bajo la base pragmática siguiente:

Aplicación del análisis por sistemas, en comparación con las formas tradicionales del análisis por componentes.

Su visión analítica siempre tiene una naturaleza interdisciplinaria.

Requiere de un equipo de trabajo interdisciplinario, para abordar cualquier problema.

Lleva los problemas científicos al campo de la acción y de la decisión.

Requiere de un coordinador con preparación multidisciplinaria y con mentalidad generalista más que especialista, aunque ello no está en conflicto con el hecho de que pudiera ser experto en un subcampo específico.

Todas las características anteriores permiten visualizar y obtener fácilmente, a niveles ejecutivos, las soluciones cualitativas y cuantitativas más idóneas en la operación y manejo eficiente de los sistemas naturales.

<sup>6</sup> Odum, H. T. *Environment, Power and Society*, Wiley-Interscience, USA. 1971. p. 1-58.

### 3.0 LOS MÉTODOS DE LA GEOCIENCIA

El uso de la metodología sistémica enfocada al estudio del medio natural se basa en el conocimiento particular de fenómenos que se obtienen de la realidad o de modelos experimentales. Este tipo de análisis considera teóricamente que los procesos naturales mantienen una operación que se encuentra organizada en el tiempo y en el espacio como un conjunto de componentes encadenados y no como una serie de procesos aislados; por ello, el conocimiento detallado de los procesos simples que entran en juego en la operación interna de un sistema natural es básico para el análisis integral y, además, permite el estudio y la elaboración de los modelos más apropiados para representar adecuadamente la complejidad de los medios naturales.

Durante el funcionamiento témporo-espacial, la condición instantánea que presenta un sistema se denomina "estado", el cual se caracteriza por su composición, organización y flujo de energía y materia, todos definibles como parámetros del sistema. El "estado" puede ser estable, variable a través del tiempo y del espacio, y la complejidad de un sistema se expresa por el número de dimensiones que éste adquiere en cada estado (relación fase-espacio). El aprovechamiento de los modelos tiende a facilitar la investigación de todos los procesos que actúan en diversos tipos de "estado" previamente determinados. La descripción funcional de un sistema implica los siguientes aspectos:

- a) La naturaleza de las entradas.
- b) La relación fase-espacio.
- c) El modelo relativo a los procesos de entrada-salida y sus estados en el tiempo.

Los sistemas naturales pueden considerarse como partes de supersistemas (conjuntos de unidades geomorfológicas y biomas a escala mundial), o, también, como integrantes de subsistemas (unidades regionales y locales).

Así, los sistemas pueden agruparse en módulos, para formar supersistemas, a nivel mundial, que pueden identificarse como unidades de entrada y salida de materia y energía que con frecuencia se combinan y enlazan en tal forma que la salida de uno se encadena a la entrada de otro ubicado en un nivel inferior (por ejemplo, la salida de materiales por erosión, en un sistema de decapitación hídrica, conduce a

la formación de un sistema de sedimentación formado por bancos aluviales o terrazas fluviales) (7).

La organización interna de los sistemas y su evolución puede comprenderse mejor cuando se analizan los procesos de retroalimentación que induce modificaciones al control de las variables externas. Dichos procesos son de dos tipos:

Los de realimentación positiva, que ocurre cuando en el sistema suceden acciones que favorecen cambios en la misma dirección del efector, determinará estados aún más violentos de funcionamiento, y los de realimentación negativa que operan cuando las acciones del efector provocan en el mismo sistema cambios en sentido inverso, o sea, la generación de acciones que tiendan a regular o a evitar su efecto en el funcionamiento del sistema y son, por tanto, los mecanismos de control que permiten llegar a mantener los estados de equilibrio o fases de estado "estable". Un estado estable se caracteriza, entonces, porque en él se mantiene un alto nivel de autorregulación (entropía máxima) más común en el tiempo que en el espacio. O sea que, un sistema natural puede perdurar largo tiempo cumpliendo su función, sin que esto implique que el sistema no varía en forma y componentes, puesto que, de hecho, existe una serie continua de cambios que obedecen a regulaciones secundarias, los cuales en un momento dado se suman estableciendo una regulación primaria o modificación autoevolutiva. Como dichas regulaciones secundarias se suceden a una escala temporal más corta, son las que mejor conocemos y, por tanto, las que más sirven de base para identificar los estados evolutivos de un sistema. De dichas acciones conocemos:

1) Cambios secundarios de respuesta lenta que resultan de los cambios primarios. Por ejemplo, la precipitación fluvial hace variar las descargas fluviales que, a su vez, alteran la geometría hidráulica; en un plano secundario, los cambios en ella modifican también la vegetación y la humedad del suelo, todo lo cual conduce a una mayor alteración de la geometría de la cuenca y de las descargas.

<sup>7</sup> Chorley, R. J. 1971. "The Role and Relations of Physical Geography" in *Progress in Geography*, Vol. III p. 99-102. Eduard Arnold, 41 Maddox St. London W.

2) Fases de alteración incipiente que se presentan como cambios de estado drástico los cuales son frecuentes en ciertos sistemas que exhiben características de realimentación positiva dominante en periodos limitados. Tal como ocurre en el caso de una vertiente donde la intensidad de la lluvia afecta directamente la intensidad de la escorrentía y ésta, a su vez, la erosión. Así, a mayor escorrentía mayor erosión, y a mayor erosión menor infiltración, y al existir menor infiltración se realimenta positivamente la escorrentía.

Fuera de los casos anteriores, la mayor parte de los sistemas abiertos, del tipo autorregulable, operan con una realimentación negativa dominante. La autorregulación implica una reorganización interna del sistema, que se realiza en un periodo de recuperación (homeostasis), que depende de:

- a) La resistencia a los cambios de entradas del sistema individual de componentes.
- b) La complejidad del sistema o fase temporo-espacial que depende del número de cadenas de elementos involucrados.
- c) La magnitud y dirección de los cambios de entrada.

El tiempo de recuperación de algunos sistemas es bastante corto, por ejemplo: el lecho de un río se ajusta inmediatamente a los cambios de los gastos. Pero para otros es bastante largo, por ejemplo, los cambios morfoclimáticos regionales.

Desde el punto de vista teórico, el tiempo de recuperación es un indicador de la resistencia del sistema para responder a los cambios externos y modificarse. Sin embargo, en la práctica el concepto se complica por el hecho de que los elementos del sistema presentan diferente tiempo de recuperación y, además, porque tampoco tienen la misma antigüedad evolutiva. Así, por ejemplo, no puede aceptarse que, por el hecho de que unas formas del paisaje se encuentren en equilibrio, otras tengan que estarlo también; sin embargo, teóricamente es posible asociar diferentes fenómenos de gran duración, por el examen de su tendencia al estado estable. Así, donde el tiempo de estabilidad ha perdurado, el sistema parecerá inalterable aunque no se tenga seguridad absoluta acerca de sus variaciones periódicas ni de la duración de éstos. Esta concepción evita, en principio, mucha de la confusión metodológica que se ha tenido

hasta ahora, al analizar los cambios generados en el medio terrestre durante el último millón de años (pleistoceno y reciente), debido a que ignora el funcionamiento de sistemas en donde los cambios fueron tan rápidos y tan violentos, o menos violentos pero más frecuentes, que dieron como resultado una serie de formas confusas y parciales en los lapsos más o menos largos de recuperación.

De lo anterior se infiere que pocos sistemas geomorfológicos presentan una realimentación negativa cuando se les considera a lo largo de grandes periodos de tiempo, ya que el cambio progresivo de las entradas a través del tiempo provocan continuos cambios subsecuentes. Estos cambios pueden momentáneamente ser encubiertos por los mecanismos de la autorregulación del sistema, de tal manera que éste aparezca externamente como permanente, aunque internamente esté sufriendo reajustes y modificaciones continuas, de tal manera que su percepción deba investigarse por otros caminos; por ejemplo, la pérdida progresiva de la fertilidad de los suelos tropicales y su degradación posterior queda, por lo común, enmascarada por la exuberante vegetación secundaria que sigue caracterizando a un sistema de selva.

### 3.1 El Aprovechamiento Sistémico en la Geomorfología

El análisis sistémico como base de los estudios geomorfológicos se ha usado desde principios de siglo, pero sus éxitos mayores se tienen a finales de la década de los años 40 y, básicamente, en la de los 50.

Rusell en 1949 y más particularmente Strahler en 1952 (8), llevaron la primacía en lo que ellos denominaron "nueva geomorfología", que tuvo como tesis el análisis funcional de la asociación entre las medidas, las formas y los procesos, haciendo uso de herramientas estadísticas. Este tipo de metodologías se desarrolló más dentro del campo experimental, porque se basó en el uso de modelos de simulación con los que se intentó descifrar la génesis del modelado actual, más que su carácter cronológico evolutivo. Desgraciadamente, estos estudios cayeron muchas veces en el error de querer meter lineal-

mente y bajo principios totalmente mecanicistas los fundamentos operacionales de los procesos morfogenéticos, lo cual dio paso a que se tuvieran resultados y conclusiones que estaban muy alejadas de la realidad.

Sin embargo, en su época, esa fue una actitud renovadora y positiva ante la concepción tradicional de una geomorfología muy descriptiva y demasiado influenciada por la geología.

Hoy día, los estudios sistémicos vuelven a tener importancia dentro del campo experimental de la geomorfología donde empiezan a tener éxito los modelos de sistemas simples como los que participan en la evolución de una vertiente; sin embargo, el costo que involucra el uso de esta tecnología la hace aún poco práctica para la investigación y más aún para la docencia. El énfasis que se da a este tipo de análisis implica la noción de que los elementos y procesos de la morfogénesis se encuentran organizados en su relación fase-espacio, como una operación conjunta e ininterrumpida y no como una serie de procesos aislados. Sin embargo, y sobre todo en la formulación de los modelos experimentales, el conocimiento detallado de los procesos simples que entran en juego durante la operación natural de los sistemas morfogenéticos es fundamental puesto que ellos son los que nos llevan a los "factores clave" que rigen el comportamiento de los procesos complejos que determinan la operación integral. Por eso el desglose de toda la serie de variables que entran en juego en los sistemas morfogenéticos facilita el diseño de modelos cada vez más cercanos a la realidad.

Según las características y finalidades pretendidas en este campo de acción, el análisis de los sistemas morfogenéticos puede realizarse de acuerdo con tres modelos teóricos de operación.

La de los sistemas sintéticos (modelo descriptivo).

La de los sistemas parciales (modelo descriptivo explicativo).

La de los sistemas generales (modelo explicativo.).

### 3.2 Los Sistemas Sintéticos

Estos se denominan también de "caja blanca" y constituyen la base de los modelos experimentales de tendencia mecanicista, en los que

<sup>8</sup> Brunson, D. and Doorkamp, J. *The Unquiet Landscape*, Indiana University Press, Bloomington and London, 1974. p. 160-167.

se designa y controla de antemano el funcionamiento operacional de los procesos y su respuesta.

La elaboración de los modelos sintéticos implica un conocimiento detallado y una información exhaustiva que permita la identificación de los módulos funcionales que agrupan variables de reacción similar. Dichos módulos funcionales constituyen, entonces, los elementos de la estructura operativa del sistema, y es con base en ellos que se hace la simulación funcional de las reacciones, modificaciones y cambios que constituyen la respuesta general del sistema, tales como: sentido en el impulso de los efectores, unidades de variables que cambian juntas, tipos de realimentación, etc.

Otras características de este tipo de sistemas es que sus variables están altamente correlacionadas tanto en su función interna como con los factores externos que la afectan, todo lo cual hace que se pueda definir en ellos patrones funcionales lineales, internos y externos. En sus formas más sofisticadas, las estructuras de correlación inducen la generación de modelos denominados de proceso-respuesta, que son de alta utilidad en el esclarecimiento de los fenómenos operacionales de mecanismo-proceso que se pueden usar como base para generar hipótesis predictivas de mayor complejidad. Así, los valores de superficies de tendencia en los gráficos, al ser considerados como valores de respuesta, dan valor especial a la función de los modelos de proceso-respuesta.

### 3.3 Los Sistemas Parciales

Estos se conocen también como de "caja gris", y son los que más se han usado en la solución de problemas prácticos, y en el área de las ciencias de la tierra. Sobre todo en lo que se refiere al análisis intraespacial de los diferentes módulos operacionales de una región o localidad de gran variabilidad de sus componentes.

En los sistemas parciales el interés se centra en el análisis operacional de las relaciones que se establecen entre los diferentes subsistemas o módulos operativos del sistema general, a partir de los cuales se trata de identificar y predecir el comportamiento del conjunto general, o sea que, a partir de los procesos internos se trata de llegar a conocer una función determinada o una presumible.

Por tanto, en este tipo de sistemas no se requiere tanto conocer el mecanismo detallado de los subsistemas como en el modelo de los sistemas sintéticos, sino sólo busca los patrones de la respuesta funcional de los subsistemas. Dichos patrones se usan, entonces, como bases más explicativas que descriptivas del comportamiento general del sistema teórico.

Un ejemplo característico del sistema parcial es el que se aplica a la predicción de gastos en una cuenca fluvial, a partir de diferentes valores de tormentas. En dicho sistema lo que se conoce es:

- a) La repartición de la precipitación entre la infiltración y el exceso de lluvia.
- b) La diferencia del gasto entre el flujo base y el de crecida.

Por tanto, considerando el problema a partir de la relación entrada-salida (precipitación-escurrimiento) que se realiza en la cuenca, el efector modificado, en forma de exceso de lluvia, es el que se usa en la variación del producto de salida o crecidas. A todo ello se aplican procesos de simulación matemática a fin de producir una variación continua en la función entrada-salida, a obtener un patrón significativo que se ajuste lo más real posible a la relación intensidad de la lluvia-crecida obtenida.

Es claro que el fundamento práctico de los sistemas parciales es el de aprovechar lógicamente los elementos que se encuentran altamente relacionados y, en lo posible, soslayar la importancia de otros factores de la tendencia general. Así, el uso de estos modelos se restringe en aquellos casos en los que los factores, aunque fuertemente correlacionados, actúan en forma independiente. Tal sería el caso, por ejemplo, si se intentara analizar la relación entre la precipitación y la densidad del drenaje, relación que sólo podría establecerse en forma mucho muy general, ya que los factores como la topografía, la cobertura vegetal, la litología, la permeabilidad del suelo, la escorrentía, etc. son todos factores que se correlacionan en función de la densidad del drenaje; sin embargo, todos actúan en forma independiente y, por tanto, salen de la tendencia general. De manera que, antes de intentar una relación precisa como la propuesta, se necesitaría contar, de antemano, con grupos de correlación de varia-

bles unificadas, tal como las que proporciona el análisis de los sistemas sintéticos.

### 3.4 Los Sistemas Generales

Estos implican la concepción fenomenológica-conductista más generalizada, de la operación compleja de un sistema. En ellos se requiere de poco detalle y poca información, ya que esencialmente se trata de explicar y predecir su comportamiento, sin ocuparse de su composición interna ni de los procesos que puedan tener lugar en su interior. Se construirá, entonces, un modelo del tipo "caja negra", o base del funcionamiento global de un sistema, en la que se considera como propiedad básica la relación entrada-salida.

En el campo de la geomorfología los modelos de caja negra han servido de base a la mayor parte de los trabajos sobre el comportamiento de los sistemas morfogenéticos.

Así, la mayor parte de las hipótesis y fundamentos teóricos de la morfogénesis se han desarrollado a partir de decisiones intuitivas y generalizadas tomadas más en forma implícita, a partir de la observación de características supuestamente dominantes en el desarrollo de las formas terrestres.

Por tanto, gran parte del trabajo en la investigación de la génesis y evolución del relieve y del modelado se han desarrollado a partir de los factores de entrada (muchas veces tomados también en forma intuitiva) y lo que resulta como producto o modelado observable. Así, los resultados de los patrones y procesos que entran en concurso a través del tiempo, así como el rango de los procesos implicados, son aspectos que nosotros no podemos considerar en forma directa puesto que de ellos no existen sino vagas ideas y poca información. Por ello, en un análisis cerrado podemos decir que, conceptos tales como el equilibrio dinámico, de Gilbert; el ciclo de erosión, de Davis; la denudación cronológica, de Wooldrige y Linton; el sistema morfogenético, de W. Penck; la geomorfología climática, de Tricart y Büdel, etc., se basan en consideraciones netamente intuitivas que han resultado de la observación de los patrones más característicos en el comportamiento de la morfogénesis, y no, como aparentemente se cree, en un detallado conocimiento de los procesos morfogenéticos internos de cada

subsistema y del sistema general. De manera que los conceptos más tradicionales de la geomorfología han resultado de procesos inductivos tomados a partir del producto o geoformas básicas resultantes de la combinación entre los procesos endógenos y exógenos.

De acuerdo con la consideración anterior, es claro que el método de los sistemas generales viene a dar cuerpo fundamental y funcional a todos esos aspectos controvertidos e intuitivos de las diferentes escuelas geomorfológicas. ¿Sería posible, así, congeniar el ciclo de erosión con el funcionalismo dinámico dando la veracidad y el peso que cada uno merecen?

Parece que todo ello será posible en un futuro no lejano; por lo pronto, la metodología de las cajas negras en el estudio de los sistemas geomorfológicos es de dos tipos: el de retroalimentación negativa y el de retroalimentación positiva. Con base en estos dos tipos de comportamiento se puede encontrar la clave para fundamentar la validez de los diferentes conceptos de la funcionalidad de los sistemas terrestres. Chorley, Dunn y Beckinsale (9) han actualizado ideas como la de G. K. Gilbert, 1877, quien en su equilibrio dinámico trató de encontrar el total de ajustes que se realizan a partir de las relaciones de forma-proceso y forma-conforma, concediendo poca importancia al proceso fluvial como factor morfogenético principal; modelo que ha sido formulado bajo la base de la realimentación negativa como patrón básico de la morfogénesis, y que ellos denominan de "tiempo perdurable".

La idea en sí ya había sido tratada también por Horton y Strahler desde 1950 (10), cuando revivieron el interés por las ideas de Gilbert cuyo modelo jerarquiza valores de importancia de las formas, por su tendencia a mantener un estado estable, fundamentado en conceptos de realimentación negativa.

La tensión permanente que implica el modelo de equilibrio funcional de Gilbert en las formas terrestres ha sido la base de ataque a las ideas de Davis, principalmente dentro del campo de la geomorfología climática que rebate

<sup>9</sup> Chorley, R. J. 1962 "Geomorphology and General Systems Theory", U. S. Geological Survey, *Professional Paper* 500-B, 10 p.

<sup>10</sup> Strahler, A. N. 1950. "Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis". *Amer. Journal of Science*, Vol. 248 pp. 673-693, 800-814.

la uniformidad cíclica y armónica. Birot, 1960; Budel, 1963; Butzer, 1964; Tricart, 1975; Pelletier, 1950 y Holzner y Weaver, 1965; citados por Chorley (11), tienen en diferentes formas lineamientos generales de los procesos que cada régimen climático imprime a las estructuras geológicas para modelar el relieve. Así, el conjunto de los procesos geomorfológicos son vistos sólo como resultados a partir de las formas generales, sin que ello se fundamente en una investigación detallada de cada uno de los procesos internos involucrados. De esta manera, el concepto general de estas teorías induce a presentar los medios geomorfológicos actuales como un producto derivado de los reajustes continuos del efector climático. Budel (12) asume que toda esta serie de reajustes se realiza dentro de largos periodos de recuperación en la evolución general del sistema y que, por tanto, el modelo general presenta formas y procesos fósiles y recientes, e inactivos o activos, o ambos, con periodos de recuperación que se cumplen periódicamente y que son la base analítica de la geomorfología climática.

El tipo de modelos de sistema de caja negra, de realimentación positiva, contiene los procesos que se han hecho más populares y, por tanto, son los que han tenido mayores éxitos dentro del campo geomorfológico. Sin embargo, este análisis también carece de la precisión de las relaciones que se establecen entre las formas y sus procesos morfogenéticos y alude más bien a la transformación de las formas o del modelado como respuesta a los cambios de entrada (usualmente considerados como cambios del nivel de base).

Este modelo de realimentación positiva implica periodos de cambios progresivos que obedecen a ajustes de tensión continua, y no solamente a ajustes por tendencias hacia el equilibrio del estado estable. Este es el modelo que domina la historia del conocimiento geomorfológico, puesto que parte de la relación directa entre el proceso y la forma.

Es en este tipo de modelos en donde encaja mejor el sistema del ciclo geográfico de Davis,

que indica una secuencia progresiva e irreversible en la transformación de las formas de la tierra a partir del impulso de un largo insumo de energía como puede ser, por ejemplo, el movimiento epigénico. Así, el ciclo semeja la operación de un sistema cerrado que tiende a obtener una entropía máxima en el tiempo.

Aun los estudios que tratan de la "denudación cronológica", como los de Bauling, 1929; Johnson, 1931; Wooldrige y Linton, 1955 (8) han sido concebidos siempre a partir de la interpretación dada por el registro de las formas de denudación que resultan de diferentes periodos de erosión o variaciones de entradas que usualmente se interpretan como cambios en los niveles de base regionales, por una condición diastrófica o eustática.

Podemos considerar, también, que el sistema geomorfológico, de Walter Penck, es un sistema general de caja negra con realimentación positiva, puesto que en él se asume (8) una continua variabilidad en el reflector básico (cambios de nivel de base) por causas tectónicas. En esta concepción, como en las anteriores, tampoco ha sido necesario conocer en forma detallada el funcionamiento interno, ya que la premisa fundamental se ha realizado con base en la observación de las características que son, supuestamente, las dominantes.

Naturalmente que los partidarios de una u otra corriente (cajas negras con realimentación positiva y negativa) han tenido importantes discusiones de las que empiezan a surgir ideas que tratan de conciliar ambas posturas. Así, Chorley (11) y otros han sugerido un nuevo modelo que combina dichas posibilidades, o sea, encontrar relaciones funcionales entre los modelos de tiempo permanente, con realimentación negativa, y los de tiempos periódicos de realimentación positiva, de manera que los ajustes que propenden a estados estables en ellos los han introducido en un nuevo concepto denominado de tiempo directo. Este nuevo "sistema graduado", y la innovación más importante la han formulado Schum y Lichty, al considerar que la distinción básica entre la causa y el efecto en la morfogénesis depende siempre del periodo de tiempo considerado. Así, para grandes periodos de tiempo ellos aluden al establecimiento de un "tiempo ciclo" en el cual la característica más importante en la generación y establecimiento de las geofomas consiste en la distinción de los cambios que se

<sup>11</sup> Chorley, R. J. "Models in Geomorphology" *Physical and Information, Models in Geography*. University Paperbacks. Pub. Methuen and Co. London EC. 1967. p. 59-60.

<sup>12</sup> Budel, J. 1959. "The Periglacial-Morphologic effects of the Pleistocene Climate the entire World", *International Geology Review*, I; p. 1-16.

generan con un solo cambio energético desde su inicio hasta su decaimiento, de tal manera que en cada secuencia de cambio de estado del sistema puede identificarse una relación consistente entre las variables dependientes-independientes que influyen en los estados de evolución de los geoformas, razón por la cual se denomina a cada etapa de este modelo, "tiempo graduado".

Dicho "tiempo graduado" puede identificarse, entonces, en los sistemas en los que se ha mantenido durante un lapso amplio un equilibrio dinámico entre las formas y los procesos; esto es, donde se asume que las acciones morfogenéticas han sido dominadas por una realimentación negativa independiente del tiempo (11). De manera que, aunque esta suposición no se pueda aplicar al mismo tiempo a todos los componentes de un sistema geomorfológico, la idea es que en ella se incluya el mayor número de características posibles a fin de que la graduación temporal que se establezca sea también la más uniforme desde el punto de vista evolutivo de sus componentes.

Por lo anterior, el tiempo graduado viene a sentar un principio para lograr establecer correlaciones adecuadas entre los fenómenos de proceso-respuesta. Así, los periodos cortos de estabilidad de un sistema geomorfológico que se suceden en un tiempo graduado, son denominados "tiempo estable", y en ellos las relaciones entre formas y procesos pueden ser establecidas con alto nivel de optimización. Es en este rango donde mejor se ubican las relaciones entre la ingeniería hidráulica y la evolución morfogenética en la geometría fluvial. Aunque esta fracción no provea, en la continuidad del tiempo, en modelo evolutivo general e integrado.

#### 4.0 LOS MÉTODOS DE LA ECOCIENCIA

La relación en el tiempo y en el espacio del hombre y la biosfera se puede resumir como la capacidad que éste ha intentado alcanzar para administrar los recursos naturales del planeta; relación que sería óptima a medida que el hombre usara, conservara y generara dichos recursos sin menoscabo del medio natural. Para ello se requiere del análisis estructural y funcional de la biosfera y de las reacciones que en ella suceden conforme se incrementa la intervención humana.

En su proceso evolutivo, la biosfera se ha modificado en función del clima, del sustrato geológico de los procesos morfogenéticos, de la información genética disponible y de la acción de los organismos vivos, hasta transformarse en un sistema complejo de unidades interdependientes llamadas "biomas", de las que son buenos ejemplos las grandes regiones naturales del planeta tales como: las praderas, las selvas, las sabanas, etc. Regiones que forman la mayor unidad de comunidades que es útil identificar funcionalmente. En el bioma la "forma de vida" de la vegetación climática "climax", es uniforme, esto es, en un bioma la "relación clima, suelo, vegetación" se identifica plenamente y, por ello, dichos medios pueden delimitarse como subunidades básicas de la biosfera. Así, gracias a la localización de los grandes tipos climáticos del planeta se reconocen también, por un lado, la situación de los grandes grupos de suelos (suelos zonales), que son suelos evolucionados, con caracteres prácticamente independientes de la roca madre, pero en equilibrio con el clima; tal paralelismo destaca sobre todo en territorios continentales y muy amplios en los que se puede encontrar un "pedoclimax". Por otro lado, las características de los dos primeros parámetros influyen en los tipos de comunidades vegetales dominantes haciendo que éstas adopten una fisonomía común.

Los biomas representan, entonces, las mayores estructuras funcionales del medio natural que pueden emplearse con fines de manejo, y se constituyen por una serie de complejos subsistemas interdependientes que cumplen funciones particulares y de conjunto; estos subsistemas son unidades estructurales que denominamos "ecosistemas".

#### 4.1 Conceptos Fundamentales de la Ecociencia.

Antes de analizar las unidades ecológicas individuales y su clasificación, es conveniente familiarizarse con la terminología que se emplea tanto para los geosistemas como para los ecosistemas.

En 1869 Ernesto Haeckel introdujo el término "ecología" para significar el estudio de las relaciones de los organismos vegetales y animales con su medio ambiente; K. Mobius, 1877, profundizó el análisis de la ecología, al incluirle el estudio de los aspectos funcionales

entre las comunidades bióticas; hoy día existen 3 ramas ecológicas básicas: la "autoecología", que estudia la relación de un organismo aisladamente con su medio; la "demoecología", o estudio de una población con respecto a su medio, y la "sinecología", que se ocupa del conjunto de organismos que engloban una unidad de interacción entre ellos y su soporte físico.

Una biocinesis es una comunidad autosostenible y autorregulable de flora y fauna que se encuentra en un estado de equilibrio con su medio ambiente o biotopo. El término biogeocinesis, de Sucachev, y "holozón" (comunidad total), de Friedrichs, 1937, corresponden al término "geocomplejo", o, desde el punto de vista funcional, al de "ecosistema" propuesto por Tansley, 1935.

#### 4.2 El Ecosistema Como Unidad Fundamental.

Conceptualmente, el ecosistema es la suma total de los patrones de energía y materia contenidos en un espacio tetradimensional. Al igual que a los organismos, al ecosistema lo integran partes acopladas que actúan como módulos de un conjunto operativo. El ecosistema como un todo requiere de una fuente de energía para desarrollar la producción de materia, formas derivadas de energía y productos de desecho metabólico; todo funciona para su automantenimiento y desarrollo. Su espacio tridimensional está rodeado por otros sistemas con los cuales se relaciona, interactúa y adapta; sin embargo, carece de fronteras tangibles, por lo que su delimitación es el primer problema que se presenta, ya que éstas deben definirse claramente cuando se intenta su manejo. Únicamente el planeta tiene fronteras definidas en las que todos los subsistemas interactúan libremente; por esto, la delimitación en función del uso y producción de energía y materia requeridos por cada unidad permiten desglosar del conjunto ciertos patrones de consumo-producción que forma los límites de cada sistema operativo y que son la base fundamental en el análisis del ecosistema y de su manejo. Dicho en otra forma, el ecosistema *debe considerarse como una unidad funcional más que como una espacial*. En este sentido, los organismos y su medio se ligan inseparablemente por acciones recíprocas en las que cada uno influye sobre las propiedades del otro. Desde el punto de vista funcional el eco-

sistema incluye circuitos de energía y materia, productividad y consumo, diversidad en el tiempo y en el espacio, ciclos biogeoquímicos, desarrollo, evolución y mecanismos de control.

Desde el punto de vista de su estructura se conforma por: elementos abióticos (clima, litología, suelo, agua, etc.), elementos bióticos (productores, consumidores, desintegradores, etc.); y ocupa un espacio y un volumen variable (estratificación vertical y horizontal de la biomasa).

Toda la operación básica de los ecosistemas se realiza como si fuera una maquinaria que capta la energía solar, y por el sistema fotosintético la transforma en la energía química que determina el funcionamiento del sistema: en el proceso, las plantas verdes efectúan la fotosíntesis y quimiosíntesis; los consumidores primarios y secundarios colaboran en la distribución de energía y materia; los organismos saprofitos descomponen la materia orgánica muerta y, así, reintegran los elementos minerales al suelo hasta nuevamente quedar en disposición de ser reusados por el ecosistema; toda la operación se cumple en un ciclo más o menos largo según sea la complejidad del sistema, complejidad acorde con el número de elementos que participan en la operación.

Cuando por causas naturales o artificiales se presentan fenómenos tales como cambios climáticos, erupciones volcánicas, inundaciones, invasión de especies agresivas, fuego y, principalmente, intervenciones humanas, se crean situaciones de desajuste, interrupción de pasos operacionales, etc., que hacen inestable al sistema, ante lo cual se desarrollan mecanismos de control que buscan neutralizar dichos efectos para restaurar el equilibrio y mantener activa su función; dichos mecanismos permiten, también, que los elementos del sistema evolucionen plenamente, en etapas de desarrollo progresivo, hasta alcanzar su máximo grado de equilibrio con su ambiente físico.

#### 4.3 La Biosfera Como Unidad General.

Nosotros tenemos que empezar a ver la biosfera tal como si la contempláramos desde el espacio exterior.

Desde este punto de vista sería fácil hablar de los balances gaseosos, de los presupuestos de energía y de la magnificante simplicidad de todo el metabolismo terrestre a través de su

concha exterior. Con excepción del flujo de energía, la biosfera puede ser vista como un sistema cerrado de tipo autorregulable en el que los materiales son ciclados y reusados. La biosfera es, entonces, un gran ecosistema, pero los bosques, las ciudades y los mares también lo son, las grandes partes de la naturaleza también tienen sus secciones organizadas por sus propios procesos físicos y orgánicos dentro de su función sistémica; así, partes grandes y pequeñas operan por sus balances de energía que dependen estrictamente de las leyes que gobiernan el sistema general.

La energía básica de la Tierra proviene del Sol. Es esta energía radiante la que ordena y mantiene los procesos de vida que generan la enorme diversidad de la biosfera. Así, un organismo debe considerarse como un sistema físico-químico que se mantiene y reproduce por el uso de energía solar. Aun así, la cantidad real de energía que usan los sistemas biológicos, en comparación con la total que recibe la Tierra, es pequeña. En la fotosíntesis "se fija apenas un décimo del 1% de la energía solar recibida por la Tierra". (6). Esta fracción genera, sin embargo, la producción anual de aproximadamente 150 a 200 mil millones de toneladas de materia orgánica de la productividad primaria, en la cual se incluye el alimento para el hombre y la energía que mantiene la vida en la biosfera; es decir, los principales ecosistemas: bosques, praderas, océanos, lagos, ríos, estuarios, pantanos, etc.

Así, toda la vida sobre la Tierra depende en una forma u otra de la producción primaria de las plantas verdes. Ellos proporcionan el alimento de carbohidratos y proteínas a los herbívoros, y de éstos la energía pasa a los carnívoros. En otra cadena, los organismos saprofitos o consumidores de desechos aprovechan en último grado la energía que sacan de los restos de la materia orgánica muerta, pero no descompuesta, y ellos reintegran los elementos minerales a la tierra, cerrando el ciclo en el que lo único que entra y sale es energía.

El mismo autor reporta los siguientes valores para el flujo completo de energía en un sistema fluvial de Florida, E.U.A. "Durante un año cada  $M^2$  recibió 1.7 mill. de Kcal de energía solar. Las plantas verdes de la corriente fijaron 20,810 Kcal por año, valor de su productividad bruta, lo que representó una eficiencia de 1.2%

para la luz solar efectivamente absorbida por las plantas verdes. La respiración de las plantas consumió 11 977 Kcal/ $M^2$ /año, de manera que la productividad neta fue de 8 833 Kcal/ $M^2$ /año. Los herbívoros convirtieron en tejido 1 478 Kcal/ $M^2$ /año, en tanto que consumieron 1 890 Kcal. Del nivel primario, herbívoros, hacia el secundario, carnívoros, la productividad neta fue del 18%; en tanto que el aporte de los carnívoros fue del 15%".

Así, la energía almacenada en el cuerpo de los carnívoros fue de 1/23 300 o sea que, de 23 000 partes de luz solar incidente sólo se fijó una. Por consiguiente, cuando el hombre se alimenta de un animal salvaje, convierte sólo una fracción del 1% de la energía solar en tejido vivo.

## 5.0 EL HOMBRE EN LA ADMINISTRACIÓN Y EL MANEJO DEL MEDIO NATURAL.

Los niveles de integración del medio natural, con fines de planeación y manejo, que han surgido en los campos de la geociencia y la ecociencia pueden resumirse en la siguiente forma:

Por un lado, dentro del campo de las geociencias propiamente dicho, los sistemas se analizan en cuatro grandes niveles de abstracción:

1. **Sistemas Morfológicos.** Se forman por la relación entre componentes individuales que se correlacionan estadísticamente, para deducir ligas positivas o negativas. El cambio en el nivel de un componente implica cambios asociados en los demás componentes; cada sistema varía según el número de sus componentes, la fuerza de sus ligaduras y el arreglo de éstas dentro de cadenas de realimentación positiva y negativa.
2. **Sistemas de Cascada.** Se forman por la relación entre componentes individuales que implican la transferencia de energía y materia; así, el producto de un componente constituye la entrada de otro; las entradas y salidas pueden controlarse por reguladores, y la realimentación entre los componentes ocurre durante la secuencia de las entradas a las salidas, que pueden ser retardadas en el tiempo.

3. **Sistemas de Proceso-Respuesta.** Forman un híbrido de los primeros dos tipos en los que la asociación estadística y la transferencia de energía y materia forman cadenas; cada sistema varía en su capacidad de autorregulación, y en el transcurso del tiempo requiere de tiempos de reajuste a cambios (tiempo de recuperación).
4. **Sistemas Control de Proceso-Respuesta.** Son sistemas que pueden modificarse por la intervención humana, que afecta su operación mediante restricciones de los niveles de los componentes individuales o por el gobierno de los flujos de energía y materia.

Las cuencas fluviales son ejemplo de un sistema que puede ser tratado con los cuatro niveles. La relación morfológica entre las características del canal y la pendiente pueden ligarse con la relación de entradas salidas de la precipitación y el escurrimiento, lo que implica también una serie de sistemas de procesos-respuesta controlables en un proceso general tendiente a impedir los riesgos de inundaciones.

Por lo que respecta a la corriente de las ecociencias, ésta considera tres niveles de integración:

1. **El Ecosistema Básico.** Es el ecosistema por antonomasia; es decir, es el que representa la unidad de integración autofuncional básica, que define una comunidad representativa de poblaciones asociadas en un primer nivel de integración dinámica e interactuante con su medio físico.
2. **El Ecosistema de Mosaico.** Se define como un grupo de ecosistemas básicos integrados en una estructura cerrada y ligados funcionalmente por intercambios de energía y materia. En este tipo de sistema el disturbio en una comunidad, o la pérdida de una de ellas, genera problemas que afectan al resto del conjunto.
3. **El Ecosistema Regional.** Engloba toda una serie de ecosistemas básicos y de mosaico dentro de un marco tetradimensional definido por límites naturales, humanos, o ambos; por ejemplo, una gran cuenca hidrográfica puede ser un ecosistema definido tanto geográfica como ecológicamente; sin embargo, cuando las fronteras son más humanas que ecológicas o geográficas, es imprescindible establecer per-

fectamente los balances de energía y materia que fluyen por el sistema a través de sus fronteras jurisdiccionales, a fin de contar con el apoyo lógico y eficiente en los estudios analíticos y de manejo de este tipo de sistemas discretos. Este último nivel justifica la combinación de la geociencia y ecociencia, para contar con una visión clara de la estructura y función al máximo nivel de interacción de los dos grandes sistemas: el del bioma que encadena al hombre con su medio natural y el del soporte físico que une una región con otra en un flujo de interacciones mutuas.

- 5.1 **Bases Geocosistemáticas de la Regionalización Natural.** El término "ecología del paisaje" o "geoecología", como se llama hoy, fue acuñado por Carl Troll, 1939, cuando él desarrolló métodos de investigación fotogeográfica sinóptica. El objetivo de esta investigación geoecológica fue establecer las interacciones cualitativas entre las diferentes del medio ambiente natural o geocomplejo, considerando al medio natural como las condiciones externas que actúan sobre la unidad de vida en su habitat, las cuales son: los ciclos anuales y diurnos de la luz, la temperatura, la humedad, el contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico, la aereación del suelo, el contenido de sales y nutrientes, el pH; así como toda la estructura física del suelo, las influencias mecánicas y gravitacionales, las acciones morfogenéticas y, finalmente, los ciclos geoquímicos que ligan el agua y el aire con los organismos. Klink (13).

Un factor que debe considerarse como premisa en los objetivos de regionalización natural es la escala, ya que, por ejemplo, en un caso mínimo, un grupo de hongos que crecen en un bosque lluvioso o en un río forman un ecosistema. Pero, en un caso máximo, nuestro planeta puede ser tomado también como un gran ecosistema. Bajo esta consideración, surge la noción del "geocotopo" como una unidad modular discreta, adaptable a escalas adecuadas de regionalización. Así, las ideas antiguas de subdividir los paisajes en regiones naturales, y

<sup>13</sup> López, R. R. 1974. "La Vocación del Suelo y Optimización de su Uso" en: *El Medio Natural como Marco para el Desarrollo Urbano*. Div. de Est. Sup. de Arq. UNAM. 30 p.

considerarlas como estructuras estáticas, tienen ahora en el geocotopo una base más funcional y dinámica para precisar la diferenciación espacial de la biosfera.

La unidad basada en la interacción funcional de una biocenosis (comunidad de plantas y animales que viven juntos) y su soporte físico, fue llamado por Sucachev "biogeocenosis", para indicar que la geología aprovecha tanto el camino de las ciencias biológicas como el de las geociencias.

El aprovechamiento geocológico moderno enfoca la investigación, predominantemente, sobre el material y las relaciones dinámicas de las estructuras y su función, en tanto que éstas explican la génesis y evolución de un geosistema.

A través del estudio de las estructuras y funcionalidad de los geosistemas, la "ciencia del ambiente" penetra a fondo en el campo del análisis sistémico.

Así, cada paisaje contiene unidades regionales o geocotopos que parecen uniformes en sus relaciones de presupuestos de materia, energía y algunas otras cualidades ecológicas. Estas unidades se extienden en áreas variables, desde unos cuantos metros hasta muchas hectáreas o kilómetros cuadrados, dependiendo ello del tipo de paisaje.

## 5.2 Unidades Fundamentales de Regionalización Natural.

Las unidades básicas que constituyen las partes de la estructura de una región natural son, entonces, el geotopo y el ecotopo. Empero, es necesario distinguir entre una unidad fundamental basada sólo en el sector abiótico, y una unidad fundamental basada en todo el complejo abiótico y biótico; porque hay lugares en donde la vida juega un papel de subordinación, ya que las relaciones estructurales que existen entre los geofactores son más importantes; así, por ejemplo, la relación entre suelo-clima y balance de agua es más importante en zonas agrícolas que proporcionen las cualidades regionales de un habitat potencial (sitio) de los cultivos.

Por lo que respecta al ecotopo, es más o menos un sistema abierto de materia y energía que está normalmente encadenado con otros sistemas vecinos con los cuales interactúa. Toda la superficie terrestre constituye, así, una conti-

nuidad de paisajes o expresiones de la interacción entre geotopos y ecotopos que forman geocomplejos de unidades fundamentales. Empero, dentro de estas unidades fundamentales existen también subunidades particulares de interacción o geosistemas que, definidos como unidades discretas, forman los geocotopos. Dentro de todas las posibilidades de transición, la frontera esbozada entre dos unidades fundamentales es puramente práctica, casi siempre condicionada por los límites de que se dispone para conocer y manejar la información. Por ello, del universo de estructuras dinámicas espaciales sólo usamos estructuras parciales que generalmente convertimos en formas cartográficas estáticas. Por tanto, la unidad modular de integración espacial para el análisis de unidades regionales fundamentales es el geosistema, enfatizando en su estudio las posibilidades de extrapolar a grandes áreas los resultados localmente obtenidos.

Con este criterio, Neff, citado por Klink, distinguió dos tipos de análisis: los topológicos o estudio de lugares (unidades regionales fundamentales) y los corológicos o estudios de sitios (subunidades locales).

La subunidad de una región natural está demarcada por un umbral (ecotono) en el que el patrón de cambios provoca que ciertos ecotopos decaigan y en su lugar aparezcan otros. En esta situación particular adquiere mayor importancia el ecotopo principal, que cubre la totalidad del área, como una gran unidad evolutiva que conjuga las subunidades en estructuras modulares que son base de la estructura regional-fundamental.

Una unidad fundamental de regionalización natural comprende, entonces, algunas subunidades que se consideran justas sobre la base de su posición y características comunes. En muchos casos las unidades se caracterizan por una estructura similar sin que por ello dejen de intervenir subunidades con características diferentes, de manera que dichas características son factores de gran valor ecológico, tal como puede ser un manto freático regional, un substrato uniforme de suelo, un mesoclima característico, una condición de drenaje superficial, u otras cualidades similares que ejerzan una influencia ecológica directa.

Cuando existe la posibilidad de integrar las unidades fundamentales, surge otra categoría de integración denominada región natural.

Ellas están espacialmente intercomunicadas y determinadas por peculiaridades comunes que se basan generalmente en las estructuras geológicas, geomorfológicas y el clima, según sean los factores predominantes que caracterizan la región. Como ejemplos de agrupamientos de unidades regionales mayores podemos citar la estructura coherente y regional de las tierras altas de México, a lo largo de la parte central y montañosa del país, que varían una de otra en ciertos aspectos geológicos y climáticos. En este nivel de clasificación los detalles geocológicos están condicionados por la textura fina del relieve, la variada cualidad del subsuelo y el contenido de humedad del mismo, o, también, las condiciones climáticas que influyen en las geoformas. Este nivel de clasificación determina mayor variabilidad de la estructura ecológica regional, pero unifica las geoformas regionales. De manera que el aprovechamiento metodológico tiende a dar una generalización progresiva en la que las unidades regionales son vistas dentro de un panorama típico dominado por las estructuras geosistémicas. Así, dicha generalización progresiva puede incluir:

- La región natural.
- La zona geográfica.
- Finalmente, la biosfera en conjunto.

En México, por ejemplo, resultaría la zonificación tanto de la gradación (vertical) entre las tierras bajas y altas, como de la horizontal, entre las áreas litorales y las tierras interiores. En ambos casos el factor climático es el principal condicionante del paisaje. Esta zonalidad climática puede subdividirse según la influencia menor de las características geológicas, edafológicas y geomorfológicas (regiones), particularmente en las cadenas montañosas en donde tanto el clima como los demás factores provocan cambios ecológicos continuos. Sin embargo, esto nos diferencia una zona de otra. Así, por ejemplo, los bolsones interiores del norte del país están generados por una situación geomorfológica, en primer término, y por una condición climática en segundo. Por ello, las zonas geográficas naturales del mundo se basan, sobre todo, en modificaciones geomorfológicas de la superficie o por modificaciones al clima, que siempre confieren una expresión particular en la zonación de las relaciones clima-suelo-vegetación.

Las macrounidades zonales en todos los continentes están modificadas por cadenas montañosas paralelas al litoral, o bien por la desigual distribución de tierra y mar. Consecuentemente, al lado de la zonalidad por regiones geográficas, unidades regionales naturales menores ocurren como divisiones locales más distinguibles, sobre todo por la posición al este u oeste de una cadena montañosa.

Estas pequeñas unidades pueden ser detectadas dentro de una región natural que esté bien definida, con un grado de generalización adecuado a la escala.

### 5.3 Evolución del Sistema Humano.

El ser humano, en el transcurso de su evolución ha vivido ligado con su medio, superando etapas que paulatinamente le permitieron organizar mejor su sistema de vida a fin de lograr mayor eficacia en su medio de subsistencia; el alimento, espacio vital, casa y vestido, fueron elementos cada vez más accesibles que mejoraron su estructura cultural y normaron la interacción hombre-medio. Esta serie de éxitos fueron una fuente continua de retroalimentación en la superación de la conducta humana; de esta manera, el hombre sintió la necesidad de una mejor organización para facilitar el dominio sobre su medio ambiente. El cambio de una actitud pasiva a una activa en el uso del medio, se fincó en recompensas energéticas que él pudo valorar; el control de un área extensa aseguraba mayor fuente de alimento y motivó alianzas de conducta social que dieron la base de las culturas. La interacción de este proceso, que modificó y evolucionó aspectos físicos y culturales, se vio frenada por limitaciones que imponían los controles naturales. Más recientemente el género humano vence estas limitaciones e inicia en el medio los cambios que han trascendido desde la época histórica hasta la actualidad, manifestándose por una continua ruptura de los controles naturales que hoy día afectan seriamente la estabilidad del sistema mundial. Así, hoy se presenta un panorama de crisis en muchos geosistemas, en tanto que otros se han perdido o modificado en una adaptación para lograr nuevo equilibrio.

Estos cambios en el medio físico han repercutido también en la conducta humana, si bien en el pasado los cambios que el medio provocó en ella fueron amortiguados por ésta, debido al

tiempo tan largo de reajuste que transcurrió entre cada cambio y la lentitud con la que se transmitían los cambios por todo el sistema; es decir, hubo tiempo suficiente para permitir que los controles naturales actuaran en forma eficaz; empero, a medida que la retroalimentación positiva en el sistema de aculturación fue más eficiente, los cambios se sucedieron con rapidez y los efectos se transmitieron y repercutieron en la mayor parte del sistema, de manera que, en muchos casos, los controles no tuvieron tiempo de actuar o, cuando reaccionaron, ya no fueron suficientes ni eficaces, lo cual auspició cambios más violentos en donde la reacción no había sido debidamente amortiguada; éste es el caso conflictivo que ahora sufren las unidades culturalmente atrasadas, de economía agrícola, que aún no asimilan los violentos cambios generados por culturas más desarrolladas; o industriales que progresan desconociendo sus propios controles naturales. Aquí cabe preguntar hasta dónde llegará la evolución humana. Muchas respuestas podrían darse al respecto, pero, a nuestro juicio, existe un elemento indicador que da la respuesta deseada, y es la funcionalidad del hombre limitada por la disponibilidad del recurso energético. Es difícil reconocer que el avance de las grandes culturas se apoye en el aporte energético de combustibles fósiles; no obstante, eso acontece en la realidad. El panorama de la historia refleja siempre cambios motivados por la ambición humana de obtener mayor poder con base en un dominio energético. Las guerras primitivas y las recientes se han generado por este motivo; la tecnología y la conducta social han surgido en función del aprovechamiento progresivo del potencial energético disponible. Por ejemplo, una comparación entre las bases energéticas de supervivencia de una cultura atrasada rural y una superdesarrollada industrial, muestra, como diferencia básica, que en la segunda se emplea una fuente energética (petróleo) extra que es factor de ganancia del subsidio que se obtiene en forma natural. El éxito de la cultura más avanzada radica en el acortamiento de su cadena alimenticia (labores agropecuarias), así como en el incremento y mejoramiento de los subsidios energéticos que le permitan un uso más eficaz de la fuente energética primaria.

De lo anterior podemos concluir que, el análisis de un sistema, aparentemente complejo, puede realizarse con mayor facilidad cuando se

usa como parámetro central el flujo de la energía. Por ello un examen de la fijación y circulación de la energía por el sistema conduce a la comprensión del sistema mismo y, por tanto, de su estructura, comportamiento, desarrollo, relaciones, eficiencia, control, etc., y, en general, de todos los aspectos que ya no subsisten sólo en el terreno cualitativo, sino alcanzan el terreno de la cuantificación.

## 6.0 CONCLUSIONES

No es necesario discutir mucho el hecho particular de que los niveles menores de clasificación de la reorganización natural, tales como los ecotopos y patrones de ecotopos de diferente rango, así como las mayores unidades regionales fundamentales son de gran importancia para conocer las necesidades de protección del medio ambiente, el grado de inestabilidad de ciertas regiones y la planeación de medidas para conservar, manejar y proteger a la naturaleza en su más amplio sentido; así como, también, para resolver problemas de planeamiento regional. Para ello, en el campo de la ciencia ambiental se incrementa el ejemplo de análisis de sistemas, con el objeto de conocer los balances de los flujos de materia y energía que ocurren en sistemas terrestres. Bajo este rubro se desarrollan continuamente modelos prácticos de geocomplejos, y será cuestión de tiempo llegar a formular métodos similares para el análisis funcional completo de las estructuras complejas, regionales, con todos sus componentes.

Así, cuando los sistemas del medio natural de ciertas regiones sean analizados y entendidos en su función dinámica-evolutiva, será posible su integración y manejo óptimo, expresados por el uso de modelos de operación, evaluación y pronósticos dinámicos y no sólo, como hasta ahora, por el modelo estático que constituye un mapa. Esto es necesario, por ejemplo, para valorar lo siguiente: el balance de agua regional, conjuntamente con sus desequilibrios, capacidad y tiempo de regeneración; también el mesoclima y la tendencia a cambios en los patrones del tiempo, bajas de presión y formación de nieblas; la aereación de las regiones, incluyendo periodicidad y dirección del viento dominante, todo lo cual puede ser importante en la planeación de emplazamientos industriales, para no citar sino un caso.

Otras cuestiones que pueden ser tratadas bajo el mismo aspecto son: la vocación natural del suelo a ciertos usos, conjuntamente con medidas de conservación y manejo, la susceptibilidad a la erosión y daños por deflación; la cobertura potencial de las plantas a partir de los estados de sucesión o, también, aspectos sobre la preservación y uso de la vegetación acorde con el empleo del suelo, incluyendo los que se establecen dentro del campo de la ingeniería civil, etc.

Un problema corriente, en vista de las crecientes necesidades de recreación y las facilidades que deben buscarse con el fin de cubrir esta demanda, implica el avalúo de las presiones a que están o quedarán sujetas ciertas regiones naturales atractivas tales como la vegetación de dunas, pastos de zonas cerriles, bosques jóvenes y lagos o ecosistemas similares, ya que, aunque muchas zonas son frágiles en su biota,

otras no lo son tanto y soportan bien los desequilibrios que se les imponen, porque alcanzan a ser absorbidos por los mecanismos de reparación del sistema antes de que puedan afectar áreas mayores.

Por último, dentro de la investigación aplicada al medio natural, las respuestas geomorfológicas que pueden explicar la génesis y evolución del relieve y del modelado, como elementos aislados del contexto físico, biológico y humano son muy raras. Por ello el método geomorfológico tiene un carácter integrador y sintético que interconexiona, bajo función operativa, los elementos geológicos, climáticos, hidrológicos, pedológicos, biológicos, humanos, etc., para concluir que las formas resultan de la interacción de todos esos factores indicando, con ello, que la expresión de los paisajes lo es también de la morfogénesis.

#### BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Biot, P. *Le cycle d'érosion dans les différents climats*. Curso de altos Estudios Geográficos, Centro de Pesquisas de Geografía do Brasil, Faculdade Nacional de Filosofia, Universidad do Brasil 1960.
- Gates M. D. *The Flow of Energy in the Biosphere*, Scientific American, 1971.
- Hagget, P. *Geography a Modern Synthesis*, Harper & Row U.S.A. 1972.
- Lacoste, A. y Salanin, R. *Biogeografía*, Edit. Oikos Tau, S. A. Barcelona, España, 1973.
- Lugo, A. y Snedaker, S., *The Ecosystem Approach to management*, Dept. of Botany, Center of Aquatic Sciences, University of Florida, Gainesville, Flo., 1972.
- Melton, M. A. "Correlation Structure of Morphometric Properties of Drainage Systems and their Controlling Agents", *Journal of Geology*, 66; pp. 442-460 U.S.A. 1958.
- Odum, E. P. *Ecología*, Edit. Interamericana, S. A. 3a. ed. Méx. .D. F., 1972.
- Woodwell, G. M. *El ciclo de la Energía en la biosfera*, Edit. Alianza, Madrid, España, 1972.