INT-2310

SO - SEMINARIO SOBRE INTEGRACION DE LA DIMENSION
IENTAL EN LOS METODOS DE FORMULACION Y EVALUACION
PROYECTOS DE INVERSION

CDA-5

Organizado conjuntamente por el Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales (CIFCA) y el Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social (ILPES), con la colaboración de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) y de la Oficina Regional del PNUMA para América Latina.

Santiago, 22 de octubre al 2 de noviembre de 1979

ANALISIS DE SISTEMAS ECOLOGICOS *

Gilberto C. Gallopín

* El presente documento, que se reproduce para uso exclusivo de los participantes de los cursos del Programa de Capacitación, es Publicación Nº 14, Fundación Bariloche, San Carlos de Bariloche, Argentina.

77-8-2275

Introducción

La ecología es la ciencia que estudia las interacciones de los seres vivos entre sí y con su medio ambiente. La importancia de las interacciones en los procesos ecológicos hace que la ecología sea una ciencia integral y sintética, en la que el concepto de "totalidad", "holos" o "gestalt" sea absolutamente central. Esto ha llevado naturalmente a los ecólogos a adoptar una concepción global, sistemática, de los fenómenos ecológicos, como lo evidencia el uso temprano de términos tales como biogeocenosis, microcosmos, y ecosistema para denotar segmentos del universo más o menos definidos donde animales, plantas verdes, bacterias, sustancias químicas, factores climáticos, etc., se influencian mutuamente en mayor o menor grado y no pueden ser aislados sin cambiar sus propiedades y las del sistema total drásticamente.

El objetivo de esta conferencia es el de exponer en forma breve las características distintivas de los sistemas ecológicos, el tipo de problemas que presentan, y las bases conceptuales del análisis de sistemas como enfoque metodológico de utilidad fundamental para el estudio de los mismos.

Sistemas ecológicos

Una definición apropiada de sistema por ahora es considerarlo simplemente como un conjunto de elementos que están relacionados o interactúan entre sí. Cuando los elementos son organismos, conjuntos de organismos, factores ambientales, etc., y las interacciones son del tipo de alimentación, competencia, adaptación al medio, etc., hablamos de sistemas ecológicos.

Los sistemas ecológicos son típicamente de alta complejidad, y pueden ser considerados a este respecto como formando parte de una clase de sistemas que incluya a los económicos y sociales, y no comparables a sistemas físicos tradicionales. Los sistemas ecológicos contienen claramente el tipo de problemas que Weaver (7) llamó de "complejidad organizada", caracterizados por un número grande, pero no enorme, de variables de interés interrelacionadas en un todo

/organizado. Es

organizado. Es evidente la diferencia que presentan con los problemas de "simplicidad" (problemas de la física clásica, por ejemplo, acerca de sistemas de 2 o 3 variables) y con los problemas de "complejidad organizada" (problemas de la mecánica estadística, por ejemplo, acerca de sistemas de miles o millones de variables en las cuales cada variable tiene un comportamiento errático o impredictible, pero cuyo comportamiento agregado es predictible en sentido probabilístico). Los problemas de complejidad organizada sólo recientemente están siendo atacados por la ciencia, y representan probablemente el campo en el que el análisis de sistemas puede dar frutos más importantes y permitir grandes avances.

La complejidad típica de los sistemas ecológicos proviene en gran parte de las características biológicas de sus componentes. En cada comunidad de organismos se encuentra un gran número de especies que cambian continuamente su abundancia, su distribución espacial, e incluso sus características genéticas en respuesta a distintas presiones de selección natural.

Las transferencias de materia y energía se realizan por muchas vías complejas, y las mismas relaciones funcionales cambian en el tiempo. El número de interacciones posibles entre elementos de un sistema aumenta en forma combinatoria con el número de elementos. Es precisamente debido a la complejidad de las interacciones que es peligroso, aunque más fácil, el tomar un punto de vista parcial, y estudiar un fragmento aislado del sistema; al tratar de optimizar el funcionamiento del fragmento, generalmente encontramos que el resto del sistema responde en forma imprevista. La combinación de relaciones funcionales complicadas, generalmente no lineales, y de intrincadas marañas de interacciones hace que, a menudo, la perturbación de un elemento produzca reverberaciones que se transmiten a todo el sistema, frecuentemente retardadas en el tiempo y desplazadas en el espacio.

Puede ser instructivo el considerar en forma esquemática un tipo de ecosistema importante en Argentina, el de pastoreo, para tener una idea del tipo de interacciones posibles en un ecosistema relativamente sencillo. Los principales elementos que componen el ecosistema son:

/1) El

1) El medio ambiente físico: factores climáticos y topográficos de la zona donde existe el ecosistema.
2) Las substancias abióticas: son los elementos y compuestos químicos (como agua, nutrientes, etc.), una parte de los cuales está en solución o en el aire, directamente accesible por los organismos, pero la mayor parte está ligada a las partículas del suelo. La velocidad de liberación de nutrientes es uno de los procesos importantes de regulación del ecosistema.
3) Los productores: son los organismos fotosintéticos. En el ecosistema de pastoreo son generalmente hierbas, pastos y arbustos, a veces naturales, pero frecuentemente introducidos y manipulados por el hombre.
4) Los consumidores: son los herbívoros y carnívoros del ecosistema, con el añadido de los parásitos. El ganado es el consumidor dominante, pero siempre existen roedores, aves, insectos, invertebrados parásitos de plantas y animales, etc.
5) Los descomponedores (microconsumidores): son fundamentalmente las bacterias y hongos del suelo, que desdoblan los complejos compuestos del protoplasma muerto, absorben algunos productos de descomposición como alimento, y liberan compuestos químicos inorgánicos utilizables por los productores.
6) El hombre: desde el punto de vista alimenticio juega el papel de carnívoro en este ecosistema, aunque su papel regulador y modificador es mucho más importante que el trófico.

La anterior clasificación de elementos del ecosistema de pastoreo es sólo una de las visiones posibles del mismo, ya que la selección de elementos a considerar y la imagen mental que uno se forma de un sistema depende no sólo de los observables del sistema, sino también del "punto de vista" o, si se quiere, ideología en sentido amplio, adoptado por el observador, del nivel de detalle deseado, y de su objetivo.

Considerando el sistema desde el punto de vista de las transferencias de energía y los procesos asociados, el mismo puede ser representado, en forma muy simplificada, como aparece en la Figura 1.

/La energía

La energía luminosa, acumulada por las plantas, se transfiere parcialmente a los distintos niveles tróficos; en cada transferencia un alto porcentaje de la energía se disipa en forma de energía térmica que se escapa del sistema. El hombre, además de consumir carne, exporta ganado y a veces heno del ecosistema. Los organismos muertos y sus residuos sirven de fuente de energía para los descomponedores.

La Figura 2 muestra las principales transferencias de nutrientes y los procesos asociados dentro del ecosistema. A diferencia de las transferencias de energía, puede observarse que los nutrientes se mueven en un ciclo cerrado, desde la forma libre a los productores, de éstos a los consumidores, y de ambos a los descomponedores, los que regeneran las substancias inorgánicas. En el caso del ecosistema de pastoreo, la exportación de heno o ganado puede producir un empobrecimiento paulatino de nutrientes en el ecosistema, si éstos no se reemplazan por fertilización o manejo apropiado.

Finalmente, en la Figura 3 están representadas algunas de las principales vías de regulación y control dentro del ecosistema, junto a sus procesos asociados. El papel regulador del hombre aparece claramente en este diagrama, a través de las influencias que ejerce por medio de la aplicación de tecnología, la que no siempre da los resultados esperados. Un conjunto muy importante de procesos ecológicos de control, la competencia entre organismos de la misma o de distintas especies, no aparece en el diagrama debido a que, al nivel de resolución considerado, no se diferencia entre distintas especies de productores, herbívoros y carnívoros.

Considerando que, para obtener una visión más o menos completa del ecosistema (aun en la forma simplificada que estamos discutiendo), sería necesario superponer los tres diagramas, la complejidad del ecosistema se hace más evidente. No es de extrañar, entonces, la ineficacia de los estudios aislados sobre algunos de los elementos del sistema. En base a estudios aislados se sabe, por ejemplo, que ciertos insectos herbívoros que a veces alcanzan gran abundancia y son por lo tanto llamados "plaga", son muy vulnerables al DDT. En

/Figura 1

base a esta información, es natural el pensar que se pueden eliminar, y por lo tanto, favorecer a las plantas que sirven de alimento al ganado, aplicando DDT. Sin embargo, ya hay muchos ejemplos en que la aplicación de insecticidas resulta en un aumento de la plaga luego de un período inicial de disminución, debido a que la plaga estaba siendo parcialmente controlada por insectos carnívoros o parásitos que, como ocurre en general, son más vulnerables a los pesticidas que los herbívoros; en consecuencia, al desaparecer sus depredadores, la plaga finalmente alcanza una abundancia mayor que la inicial. Otras veces se produce un efecto semejante sobre los animales del suelo, que cumplen un importante papel en la premineralización de la substancia orgánica, lo que produce una disminución drástica de la fertilidad del suelo. En base a los diagramas, se puede ver que una modificación de cualquier elemento del ecosistema repercute de alguna manera, directa o indirectamente, sobre los otros elementos.

El problema, entonces, es cómo atacar el estudio de los complejos sistemas ecológicos de manera eficiente y global, de modo de poder analizar, predecir y optimizar su comportamiento en forma operativa. Esta es la motivación del tópico siguiente.

El análisis de sistemas

La teoría de sistemas generales es un campo nuevo que trata sobre los conceptos y propiedades fundamentales de sistemas de diferente tipo. En la teoría de modelos formales (matemáticos) de los sistemas reales o conceptuales, actualmente en proceso de desarrollo (3, 4, 5, 6).

Generalmente, un sistema es especificado por medio de un conjunto de ecuaciones (algebraicas, diferenciales, etc.), y las propiedades del sistema (modelo formal) son investigadas por medio de las técnicas deductivas matemáticas o por simulación en computadoras. Es importante distinguir entre el sistema considerado y el conjunto de ecuaciones que se utiliza para especificarlo constructivamente. Generalmente existen diferentes especificaciones posibles de un mismo sistema.

En general, la noción de sistema denota la existencia de relaciones entre los datos o variables observadas.

/Un objeto

Un <u>objeto</u> del sistema es la totalidad de valores posibles o maneras alternativas en que un atributo del sistema es observado o percibido. En otras palabras, para cada atributo A_i del sistema uno puede definir un conjunto asociado V_i (finito o infinito) que refleja las condiciones experimentales, en el sentido de especificar los valores que puede tomar ese atributo en las condiciones estudiadas.

Por ejemplo, un sistema podría estar definido por la relación entre dos atributos: A_1 = abundancia de alimento, y A_2 = estado de una población de animales. Supongamos, a un nivel de resolución muy bajo, que el atributo A_1 podría tomar valores de un conjunto $V_1 = \{0,1\}$ donde 0 = ausencia de alimento, 1 = existencia de alimento, y A_2 de un conjunto $V_2 = \{H,A\}$, donde H = población hambrienta, A = población satisfecha, bien alimentada.

El <u>sistema</u> S es la totalidad de las apariencias o valores posibles (u observaciones experimentales) de la relación entre los objetos considerados; o sea, S especifica qué combinaciones de los valores de los atributos pueden ocurrir simultáneamente, cuando éstos están interrelacionados en un sistema dado.

Simbólicamente, en su forma más general, S es un subconjunto del producto cartesiano de los objetos del sistema (el producto cartesiano de dos conjunto es el conjunto formado por todos los pares ordenados de elementos de cada conjunto).

$$S \subset V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n \qquad (1)$$

En el ejemplo considerado,

$$V_1 \times V_2 = \{(0, H), (0, A), (1, H), (1, A)\}$$

y las combinaciones que se pueden observar simultáneamente en el sistema son (0, H) y (1, A),
y por lo tanto

$$S = \{(0, H), (1, A)\}$$

que es un subconjunto de $V_1 \times V_2$

/La noción

La noción de sistema dada por la ecuación 1 es perfectamente general. Aun cuando el sistema es descrito por medio de formalismos matemáticos más específicos, como ecuaciones, por ejemplo, o incluso por medio de un conjunto de enunciados verbales, el sistema es siempre una relación expresable por la ecuación 1. Cuando un sistema determinado es especificado en términos de ecuaciones definidas en un número de variables, a cada variable le corresponde un objeto del sistema, que representa el rango de la variable. El afirmar que un sistema está definido por un conjunto de ecuaciones en un conjunto de variables, es equivalente a decir que el sistema es una relación entre los objetos respectivos especificados por las variables, donde cada objeto es el rango de la variable, y tal que para cualquier combinación de elementos de los objetos (valores de las variables), se satisface el conjunto de ecuaciones.

El procedimiento para obtener un sistema que represente o modele un fenómeno dado, es, de acuerdo a Mesarović (4).

1) Seleccionar los atributos a considerar, $A_1, \ldots A_n$.
2) Especificar (por medio de experimentos o suposiciones) los valores que pueden tomar esos atributos, es decir, los objetos $V_1, \ldots V_n$.
3) Indicar las combinaciones de los valores de los atributos que se observan en cada experimento.
4) Coleccionar todas esas combinaciones (para todos los experimentos realizados) para representar el fenómeno como un sistema.

Para que el sistema obtenido sea utilizable, es necesario tener una <u>especificación constructiva</u> adecuada del mismo. Esta especificación se hace generalmente de modo que algunos atributos (salidas, respuestas, efectos, productos) puedan ser determinados cuando algunos otros atributos (entradas, estímulos, causas, insumos) son dados. Esto implica la partición de la familia de objetos del sistema en dos conjuntos: el de <u>entradas</u>, X, y el de <u>salidas</u>, Y. El sistema general se representa como una relación entre dos conjuntos:

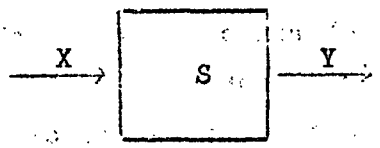
$$S \subset X \times Y \qquad (2)$$

/donde X

donde $X = V_1 \times \ldots \times V_k$

$\times \quad Y = V_{k+1} \times \ldots \times V_k$

El sistema se considera entonces, como transformando entradas en salidas (Figura 4).



En el ejemplo anterior, podría considerarse la abundancia de alimento como entrada, y el estado de la población como salida.

Existen dos enfoques básicos para continuar la especificación del sistema más allá de la distinción entre entradas y salidas: son el <u>enfoque terminal</u> y el enfoque <u>teleonómico</u> o <u>direccional</u> (4, 5, 6).

1. <u>Enfoque terminal</u>

En este enfoque, la especificación detallada del sistema se hace por medio de un "mecanismo" que relaciona entradas y salidas. El sistema se define en base a la relación entre objetos solamente.

a) Si la relación entre entradas (X) y salidas (Y) es una función, de modo que a cada entrada o grupo de entradas está asociada una sola salida, el sistema es funcional.

$$S: X \longrightarrow Y \qquad (3)$$

o

$$Y = F(X) \qquad (4)$$

Entonces, es posible describir el sistema por medio de un "mecanismo interno", que es esencialmente un procedimiento para especificar la salida que corresponde a cualquier elemento del conjunto de las entradas. Esto se hace normalmente por medio de un conjunto de ecuaciones, algoritmos matemáticos, tablas de transformación.

/Volviendo al

Volviendo al ejemplo anterior de la población y su alimento, supongamos que, en base a un número adecuado de observaciones o experimentos, encontramos que indefectiblemente se da la siguiente relación entre la abundancia de alimento (X) y el grado de hambre (Y) de los individuos de la población:

Cuando X = 0, Y = H; cuando X = 1, Y = A.

Entonces Y es una función de X, la que puede ser especificada en este caso por una tabla de transformación (Tabla 1).

Tabla 1

X	Y
0	H
1	A

Claramente, el tipo de especificación que se use depende de la naturaleza de los conjuntos X e Y. Si X e Y son conjuntos de valores discretos, se pueden usar tablas de transformación, ecuaciones algebraicas de diferencias finitas, programa de computadora, etc. Si X e Y son conjuntos de funciones continuas, se pueden usar ecuaciones diferenciales, integrales, algebraicas, etc.

Holling (2) describió un sistema depredador-presa, con el objetivo de encontrar la relación entre el número de presas atacadas por un depredador en un período fijo y la densidad de las presas, por medio de la siguiente ecuación algebraica:

$$NA = a\,TNo/\,(1 + a\,b\,No) \qquad (5)$$

donde

NA: número de presas atacadas

No: densidad de presas

T : tiempo durante el cual las presas están expuestas al depredador

a = tasa de búsqueda exitosa de presas por el depredador.

b = tiempo de manipuleo para cada presa (tiempo necesario para atacar, capturar, matar e ingerir cada presa)

/En este

En este caso, el sistema se especifica dando la función (ecuación 5) que describe cómo las entradas (No, T) se transforman en salidas (NA).

b) Si la relación no es una función, sino una relación propia, con la misma entrada pueden estar asociadas distintas salidas. En este caso se puede utilizar uno de dos enfoques principales: el de espacios de estado y el probabilístico.

Enfoque de espacios de estado

Para recuperar la causalidad que salta en la situación en que varias salidas pueden estar asociadas a una única entrada, se introduce el concepto de estado. Existen varias nociones de estado: la más simple es la del llamado estado global, que se utiliza para transformar la relación S en una función. El estado es un nuevo objeto, Z, que se introduce en el sistema, de modo que:

$$S : Z \times X \longrightarrow Y \qquad (6)$$

o

$$Y = F(Z, X)$$

Siguiendo con el ejemplo inicial, supongamos esta vez que una repetición de experimento nos da el siguiente resultado:

Cuando X = 0, Y = H, pero cuando X = 1, Y = A o H. Es decir, que cuando existe alimento, en algunos experimentos la población está satisfecha, y en otros está hambrienta.

Tabla 2

X	Y
0	H
1	A o H

Entonces, el sistema así definido, no es determinado. Supongamos ahora que, en base a observaciones más detalladas, encontramos que las poblaciones con las que realizaran los experimentos provienen de dos regiones distintas, y que se encuentra que las poblaciones de una

/región están

región están parasitadas, contrariamente a lo que sucede con las de la otra región. En este caso es posible recuperar el determinismo, introduciendo un nuevo objeto $Z = \{N, P\}$ que indica el "estado interno" de las poblaciones: N = normal, P = parasitada.

El sistema se puede especificar ahora en forma tal que la salida es una función de la entrada y del estado interno de la población.

Tabla 3

Z	X	Y
N	0	H
N	1	A
P	0	H
P	1	H

En sistemas dinámicos, en que las entradas y salidas se presentan como series temporales, el estado cambia también con el tiempo a partir del estado inicial, y la especificación constructiva del sistema es de la forma general:

donde:

$$z\ (t) = F\ [z\ (t_o),\ x\ (t_o,\ t] \qquad (7)$$

$$y\ (t) = G\ [z\ (t),\ x\ (t)] \qquad (8)$$

donde $z\ (t_o)$ = estado inicial, y $Z = \{z(t_o),\ z\ (t_1), \ldots, z(t)\}$ o $Z = \{z(t)\}$ es el <u>espacio de estados</u>, y $x\ (t_o,\ t]$ es la secuencia de entradas de t_o a t.

A menudo, la ecuación 7 se presenta bajo la forma

$$\frac{dz\ (t)}{dt} = L\ [z\ (t),\ \ x(t)] \qquad (9)$$

para sistemas continuos, o

$$z\ (t + 1) = P\ [z\ (t),\ \ x(t)] \qquad (10)$$

para sistemas discretos.

/Las ecuaciones

Las ecuaciones 7 y 8 implican que, conociendo las entradas y estado actuales del sistema es posible predecir sus salidas unívocamente. En este sentido el estado especifica completamente las "condiciones internas" del sistema en un momento dado.

Uno de los modelos más sencillos del crecimiento de una población está basado en la suposición que la tasa de incremento por unidad de tiempo del número de individuos es una función de la tasa intrínseca de crecimiento de la población (r_t) que resume las acciones ambientales sobre la población y que en el caso general puede variar en el tiempo, y el tamaño de la población N_t:

$$\frac{\triangle N_t}{\triangle t} = r_t \, N_t \qquad (11)$$

Si $\triangle t = 1$, la ecuación 11 es

$$\triangle N_t = N_{t+1} - Nt = r_t \, N_t, \quad o$$

$$N_{t+1} = N_t \, (1 + r_t) \qquad (12)$$

La ecuación 12 es análoga a la ecuación 10, donde el estado de la población está representado por el tamaño (N_t), y las entradas están representadas en r_t.

Cuando:

$$t = 0 \quad N_1 = N_o \, (1 + r_o)$$

$$t = 1 \quad N_2 = N_1 \, (1 + r_1) = N_o \, (1 + r_o) \, (1 + r_1)$$

$$t = t \quad N_{t+1} = N_o \prod_{i=o}^{t} (1 + r_i) \qquad (13)$$

que es de la misma forma que la ecuación 7. En este ejemplo, la salida es idéntica al estado.

/El concepto

El concepto de estado y el problema de la identificación de las variables de estado es de fundamental importancia en ecología, y representa uno de los pasos más importantes de la investigación, aunque no siempre explícitamente planteado. En términos intuitivos, identificar las variables de estado de un sistema implica la definición de la información que se necesita poseer sobre un sistema para poder predecir unívocamente su respuesta frente a un estímulo dado.

Enfoque probabilístico

En este enfoque, uno renuncia a predecir unívocamente las salidas a partir de las entradas; en vez de eso, se considera la probabilidad condicional asociada a una salida y, dado un estímulo x. En otras palabras, se trata de definir la probabilidad de que la salida adopte un valor dado, como una función de las entradas.

$$P\ (Y\ /\ X) \qquad (14)$$

o

$$P\ (Y) = F\ (X) \qquad (15)$$

En el ejemplo básico, supongamos que de la repetición de experimentos con el sistema población-alimento, se hubiera encontrado que cuando x = 0, y = H en el 100% de los casos;
cuando x = 1, y = H en el 40% de los casos, y
que cuando x = 1, y = A en el 60% de los casos.

Entonces el sistema se podría considerar como probabilístico, de acuerdo a

$$P\ (Y = \alpha) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0, \alpha = H \\ 0 & \text{si } x = 0, \alpha = A \\ 0.4 & \text{si } x = 1, \alpha = H \\ 0.6 & \text{si } x = 1, \alpha = A \end{cases}$$

O sea,

$$P\ (Y = \alpha) = F\ (X, \alpha)$$

que es de la misma forma que la ecuación 15, y donde α es un parámetro.

Existen también casos más complejos, cuando el sistema se debe especificar en base a la probabilidad condicional de obtener una salida y, y un estado z', dado que el estado actual del sistema es z, y su entrada es x:

$$P\ (Y,\ Z'\ /\ Z,\ X) \qquad (16)$$

/Un ejemplo

Un ejemplo ecológico de este enfoque es el proceso estocástico de nacimientos, expresado por:

$$P_N (t + \Delta t) = P_{N-1} (t) \lambda (N-1) \Delta t + P_N (t) (1 - \lambda N \Delta t) \qquad (17)$$

donde

$P_N (t + \Delta t)$ = probabilidad que el tamaño de la población sea N en el instante $t + \Delta t$

$\lambda \Delta t$ = probabilidad de que un individuo se reproduzca en el intervalo Δt

$\lambda N \Delta t$ = probabilidad de un nacimiento en la población de N individuos en el intervalo Δt.

La solución de esta ecuación es:

$$P_N (t) = \binom{N - 1}{N_o - 1} e^{-\lambda N_o t} \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^{N - N_o} \qquad (18)$$

La media y la varianza del tamaño de la población son

$$M (N / t) = N_o e^{\lambda t}$$

$$Var (N / t) = N_o e^{\lambda t} (e^{\lambda t} - 1)$$

2. <u>Enfoque teleonómico o direccional</u>

A veces solamente es posible desarrollar una especificación constructiva de un sistema en base a una descripción teleonómica, considerando al sistema como si tuviera cierto objetivo o propósito, y que su respuesta frente a los estímulos se efectúa en forma de lograr el objetivo, o de optimizar alguna función. En ecología, el concepto de "valor adaptativo" de algunos procesos para la supervivencia de la población está directamente ligado al enfoque teleonómico. Esto no implica en modo alguno un concepto filosófico de teleología en el sentido de que exista un objetivo "consciente" del sistema, de la

/misma manera

misma manera en que no se habla del termostato diciendo que "sabe que tiene que mantener la temperatura constante". Nótese que el enfoque teleonómico o direccional se requiere por razones puramente técnicas, y no filosóficas o conceptuales. Por lo tanto, lo anterior no significa que los conceptos básicos para una descripción terminal del sistema (espacio de estados, etc.) no pueden ser definidos. Más bien indica que, para una cierta clase de sistemas, las funciones necesarias pueden no existir en forma analítica o algorítmica, y por lo tanto es más eficiente usar el enfoque teleonómico. En general, los enfoques dirigidos o terminal son maneras alternativas y a menudo interconvertibles de interpretar el sistema, y sus ventajas relativas dependen del caso que se trate.

Una de las maneras más sencillas de formalizar la noción de sistema direccional es representándolo como un sistema de decisión (5). Para ello debe suponerse:

1) Una familia de problemas de decisión D; con cada entrada (x) está asociado un problema de decisión D(x). Una solución de D(x) es m(x), que forma parte del conjunto de decisiones M.

2) Un mapeo $Q : M \rightarrow Y$ que genera una salida correspondiente a cada solución del problema de decisión. O sea, para cada estímulo, las respuestas del sistema están determinadas por una solución m(x) del problema de decisión D(x), o sea $y = Q\left[m(x)\right]$.

Si x e y son funciones del tiempo y el valor de la variable de decisión m al tiempo t se obtiene de una función de las entradas y salidas, el sistema es un <u>sistema de retracción</u> descrito por

$$\begin{cases} F : X \times Y \longrightarrow M \\ G : M \longrightarrow Y \end{cases} \qquad (19)$$

o

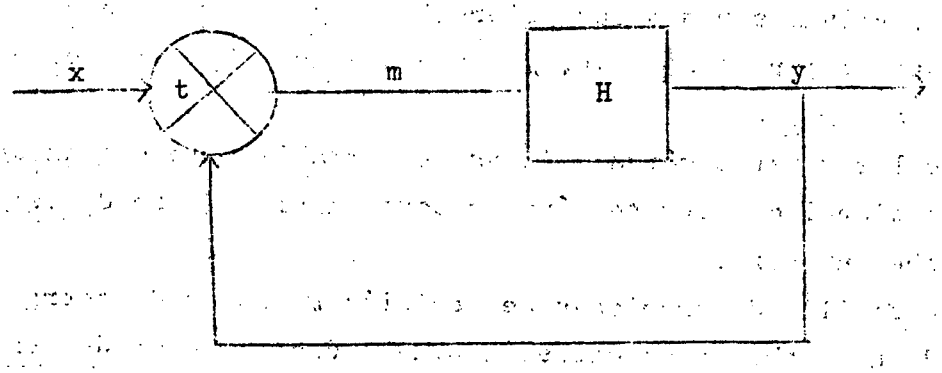
$$\begin{cases} M = F(X, Y) \\ Y = G(M) \end{cases} \qquad (20)$$

/Un ejemplo

Un ejemplo muy sencillo sería el de la Figura 5, que describe un servomecanismo cuyo "objetivo" consiste en que la salida se mantenga igual a la entrada, y cuya especificación es:

$$\begin{cases} m = f\ (x,\ y) = x - y \\ y = q\ (m) = H.m \end{cases}$$

Figura 5



Un servomecanismo sencillo.

Los sistemas ecológicos son mucho más complicados que este ejemplo; consideremos el caso de una población creciendo de acuerdo a una ley logística en un ambiente limitado. Este caso puede ser interpretado como un sistema con objetivo, si el interés radica en la manera en que el crecimiento de la población se adapta continuamente a los cambios en la capacidad de mantenimiento del ambiente. Supongamos que la ley de crecimiento de la población es descrita por

$$\frac{dN}{dt} = \frac{r}{K(t)} \left[K(t) - N(t) \right] N\ (t) \qquad (21)$$

donde K(t) = entrada, es el tamaño máximo de la población que se puede mantener en el ambiente (puede ser un factor relacionado con la cantidad de alimentos, por ejemplo); N (t) = salida, es el tamaño de la población

/en un

en un momento determinado, y r es la tasa intrínseca de crecimiento, que suponemos constante en este caso. El sistema se puede representar como en la Figura 6, y de acuerdo a las ecuaciones:

$$m\left[K(t),\ N(t)\right] = K(t) - N(t)$$

$$y = N(t) = \int_{t_o}^{t} \frac{r}{K(t)}\, m\left[K(t),\ N(t)\right] N(t)\, dt$$

El sistema actúa como si la población tratara de reducir la diferencia entre su tamaño N (t) y la entrada K (t), puesto que si la población tiene un tamaño menor a K (t), la tasa de crecimiento será positiva, y si tiene un tamaño mayor, la tasa será negativa. En este ejemplo es posible evaluar la eficiencia del sistema en cumplir un "objetivo".

En general, el comportamiento de los sistemas teleonómicos es más complejo que el de los sistemas terminales. Sin embargo, si uno posee una descripción teleonómica del comportamiento de un sistema, uno tiene medios poderosos para predecir el comportamiento del sistema bajo condiciones diferentes de las que existían en los experimentos que se hicieron para estudiar el mismo.

Cualquiera sea el enfoque usado, el objetivo final del análisis del sistema ecológico es el de comprender su funcionamiento para permitir eventualmente su utilización racional por el hombre. De este modo, la etapa final del análisis de los sistemas ecológicos es la optimización del sistema de acuerdo a algún criterio. Este es un campo técnicamente muy complejo y para ello se debe comenzar por separar los atributos y variables del sistema en controlables y no controlables. Sólo mencionaremos aquí que, en principio, el proceso consiste en manipular las variables controlables de modo que las respuestas del sistema se aproximen a los criterios de optimalidad requeridos.

El análisis de sistemas ecológicos, en sus aspectos prácticos, incluye una gran cantidad de herramientas y técnicas lógico-matemáticas, muchas recién en proceso de desarrollo. Esas técnicas abarcan métodos

/de adquisición

de adquisición de datos, muchas veces automáticos, técnicas estadísticas multivariables, construcción de modelos matemáticos analíticos y de simulación en computadora. Gran parte de la orientación actual está basada en utilización de las técnicas matemáticas tradicionales, muchas veces poco adaptadas al análisis de los sistemas complejos, y dirigida fundamentalmente hacia los aspectos numéricos. Sin embargo, el análisis de sistemas no está restringido en modo alguno al campo de las matemáticas numéricas, como pudo observarse en algunos ejemplos que consideramos. Al contrario, en la opinión del autor, muchos avances conceptuales en la aplicación de estos enfoques a la ecología pueden surgir más bien del campo de la matemática no numérica (1).

Esta conferencia está basada, más que en los aspectos de detalle del análisis de sistemas ecológicos, en sus aspectos conceptuales fundamentales, debido a que representan el punto de partida para la aplicación de las técnicas específicas y a que la complejidad de las mismas y de los modelos ecológicos que resultan excedería las posibilidades de una sola conferencia.

/Figura 6

Bibliografía citada

(1) Gallopín, G.C. Rev. Asoc. Argentina Ecología (en prensa).

(2) Holling, C.S. Mem. Ent. Soc. Can. 45, 5 (1965).

(3) Klír, G.J. An Approach to General Systems Theory, Van Nostrand Reinhold, Nueva York (1969).

(4) Mesarović, M.D. En Systems Theory and Biology (Ed. Mesarović, M.D.) p. 59 - Springer-Verlag, Nueva York (1968).

(5) Mesarović, M.D. - "Systems Concepts". Manuscrito (1969).

(6) Mesarović, M.D. - En Trends in General Systems Theory (Ed. Klír, G.J.) p. 251 - Wiley, Nueva York (1972).

(7) Weaver, W. - Amer. Scientist 36, 536 (1948).

/Publicaciones del

Publicaciones
del
Departamento de Recursos Naturales y Energía
Fundación Bariloche

Nº 1 1967 Informe de la Reunión sobre Recursos Naturales, 1-14 junio 1967, Bariloche, 119 pp.

Nº 2a 1968 Sarraillet, H.E. y Suárez, C.E., Análisis del Abastecimiento de Energía de la Provincia de Córdoba, Período 1950-1985, 111 pp + figs.

Nº 2b 1968 Informe sobre el Seminario "La Formación en Economía de la Energía", 14-15 noviembre 1968, 31 pp.

Nº 2c 1969 Potier, M., Suárez, C.E., Bravo, V. y Carlos, J.A., Seminario sobre Economía de la Energía, 23-28 junio 1969, 272 pp.

Nº 2d 1970 Tres Trabajos sobre Zoología de Vertebrados. (1) Tres Aspectos de la Zoología del Suelo de gran Importancia Aplicada; (2) Notas acerca de la Biocecología de la Paloma Torcaza o Mediana (Zenaida auriculata chrysanchenia) en la Costa del Río Uruguay; (3) Bases Ecológicas para el Control del "Tucu-Tuco" (Ctenomys sp.), 38 pp.

Nº 3 1971 Bravo, V., Legislación de los Hidrocarburos en la Argentina, 169 pp.

Nº 4 1971 Bonetto, A.A., Dioni, W. y Depetris, P. (eds), Informe preliminar sobre las Investigaciones Limnológicas de la Cuenca del Río Manso y Lago Mascardi (Río Negro-Patagonia), 61 pp. + figs.

Nº 5 1972 Bravo, V., El Nivel Octánico de las Motonaftas Argentinas en la Presente Década y la Contaminación Atmosférica por Plomo, 164 pp. + figs.

Nº 6 1972 Drago, E.C., Relevamiento Batimétrico y Notas Morfológicas. Lago Mascardi, 8 pp. + pls.

Nº 7 1972 Rapoport, E.H., Contaminación Atmosférica: sus Efectos sobre los Animales, 22 pp.

Nº 8 1972 Romero, A.J.B., Herrera, A., y Talavera Galeano, L., Banco de Datos Geológicos y Económicos Argentinos, Departamento de Recursos Naturales y Energía y Centro de Cómputo, Fundación Bariloche, 101 pp. + figs.

/Nº 9

Nº 9 1972 Seminario sobre Economía de la Energía, 3-6 agosto 1971, Oficina Sectorial de Desarrollo de Energía - Subsecretaría de Energía, Departamento de Recursos Naturales y Energía - Fundación Bariloche.

Nº 10 1973 Suárez, C.E. y Bravo, V., Una Política para el Abastecimiento Energético Argentino, 1970-1980, 247 pp.+ 25 gráficos

Nº 11 1973 Domínguez, Eduardo A. y Aliotta de Domínguez, Guida, Separación de Minerales, 27 pp.

Nº 12 1973 Seminario sobre la Economía de la Energía, Córdoba, 26-30 de junio de 1972, Oficina Sectorial de Desarrollo de Energía - Subsecretaría de Energía y Departamento de Recursos Naturales y Energía - Fundación Bariloche (en prensa).

Nº 13 1973 Rapoport, E.H., Areografía. Introducción a la corología cuantitativa, 210 pp., 44 tablas y 68 figuras.

Nº 14 1973 Gallopín, Gilberto C., Análisis de Sistemas Ecológicos, 23 pp.

A

Figura N°1

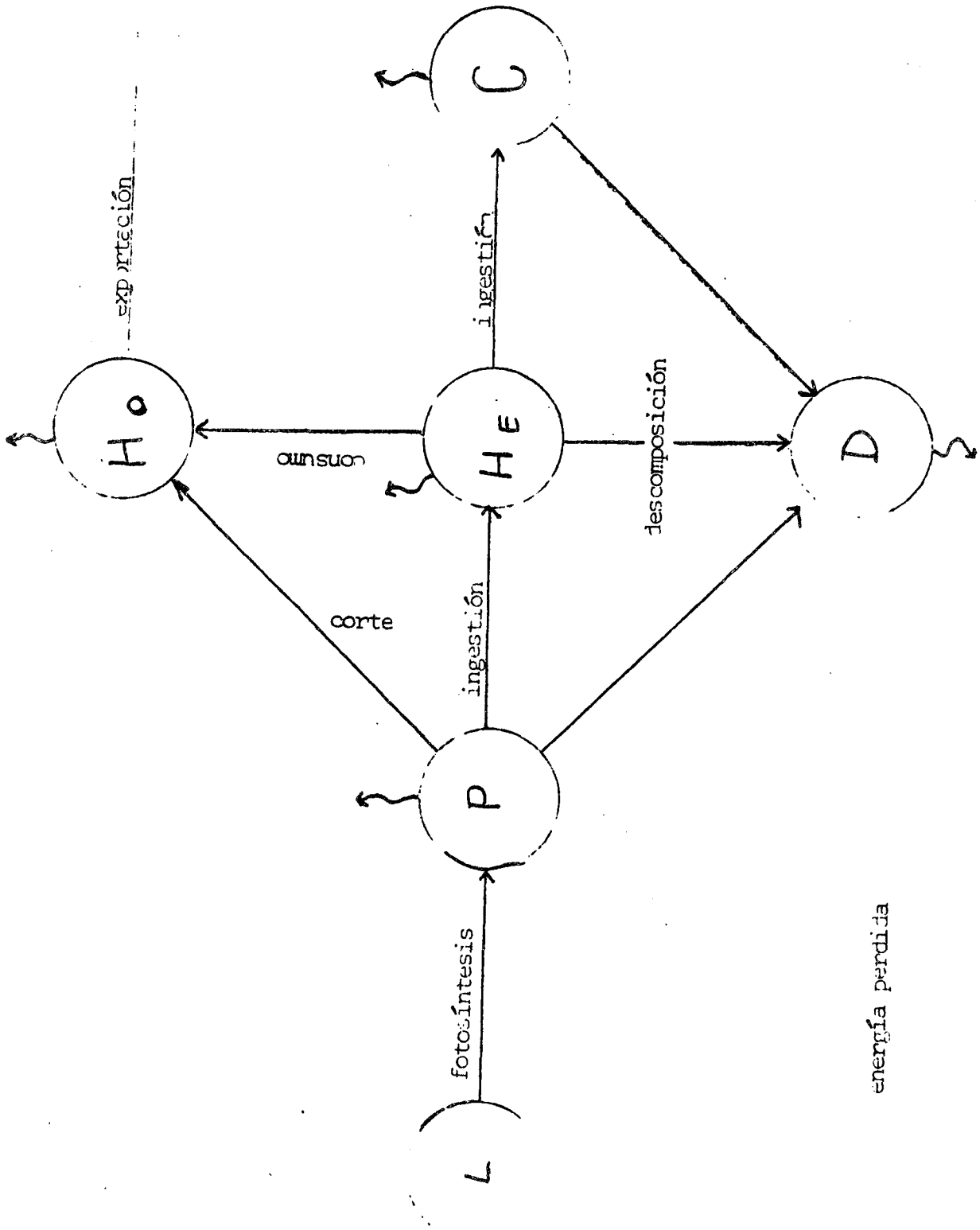


Diagrama de los flujos de energía y procesos asociados en un ecosistema de pastoreo.
L = luz; P = productores; He = herbívoros; C = carnívoros; D = descomponedores, Ho = hombre.

Figura N° 2

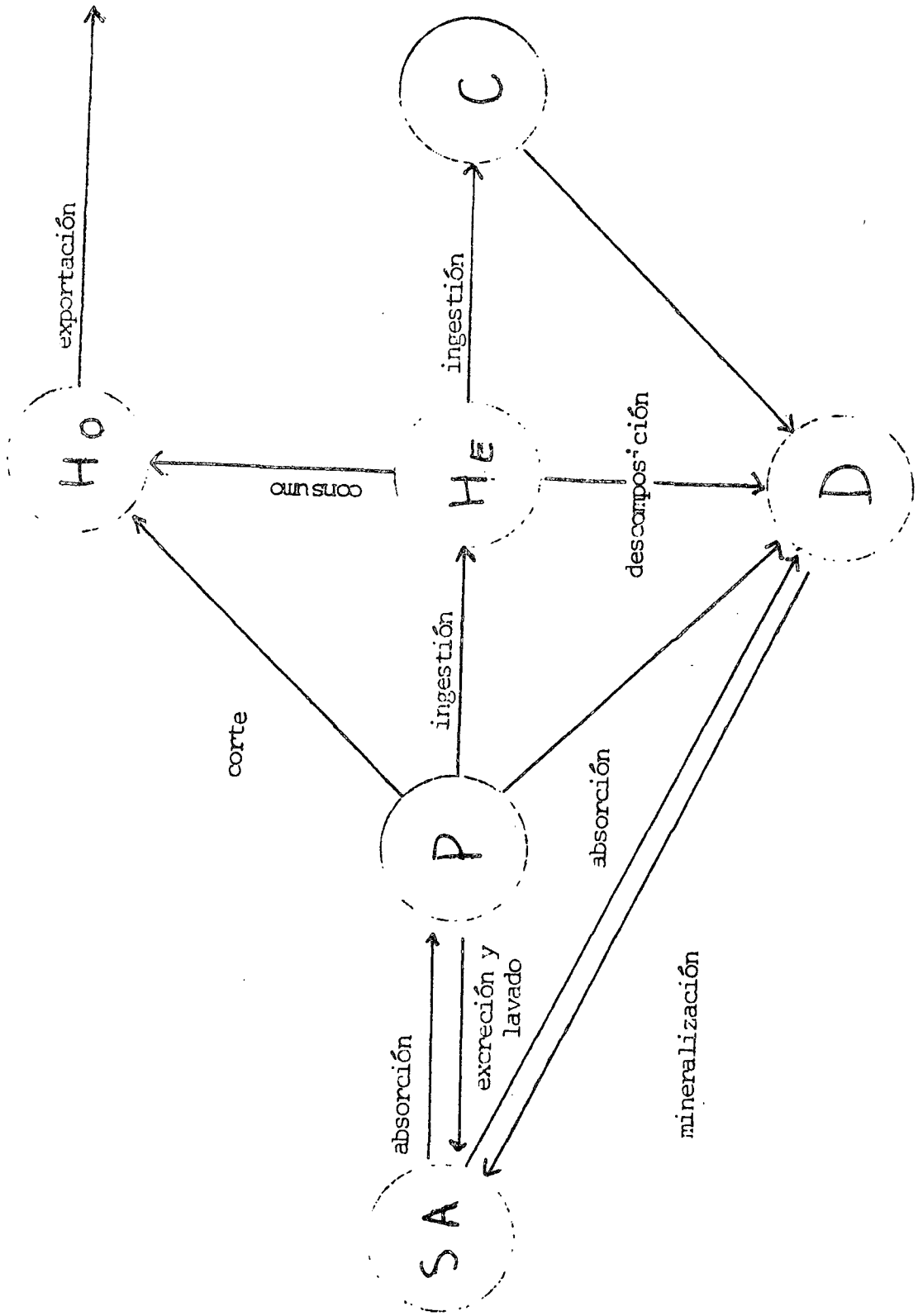


Diagrama de los flujos de nutrientes y procesos asociados en un ecosistema de pastoreo. Letras como en la Figura 1.

Figura N°3

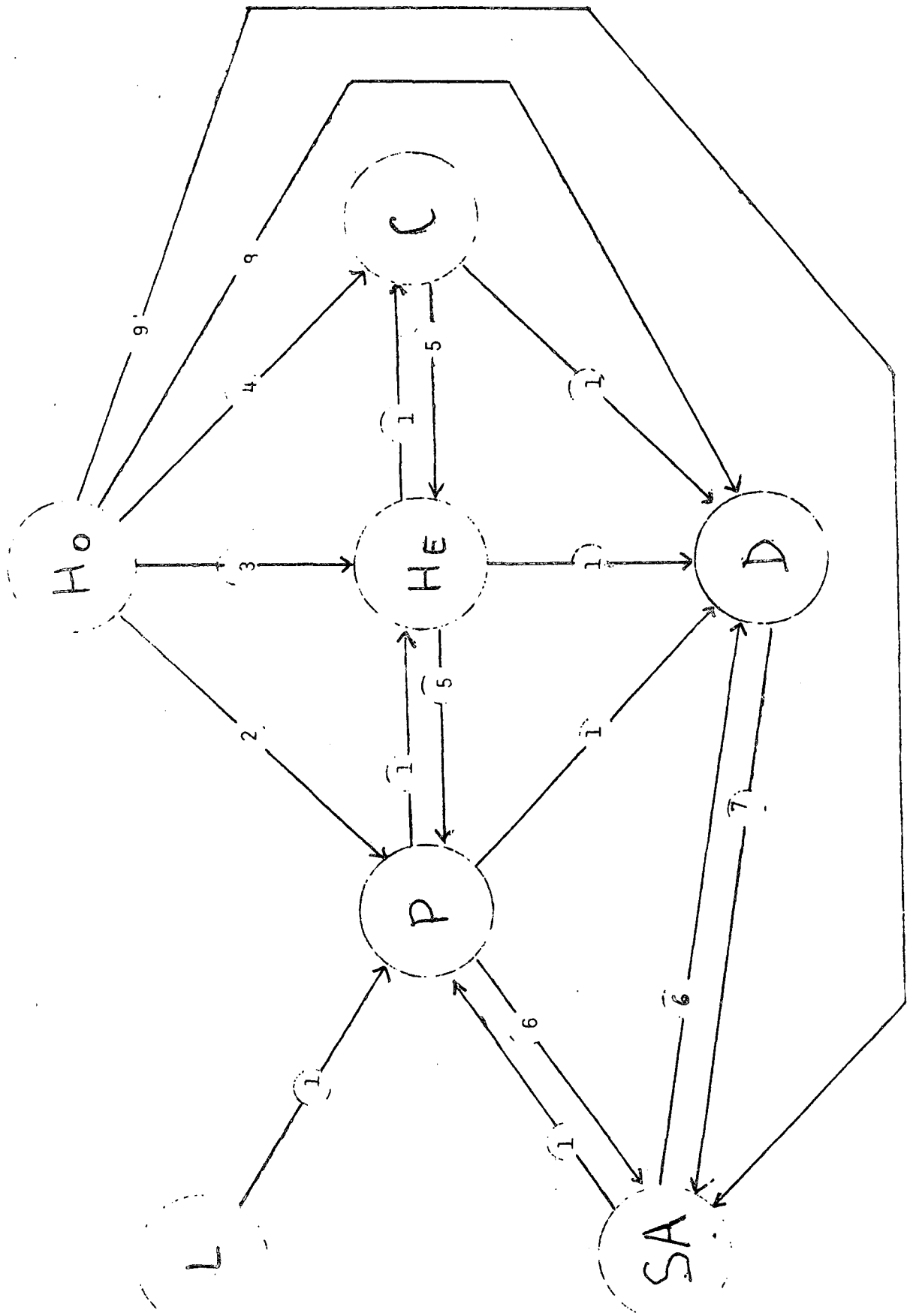
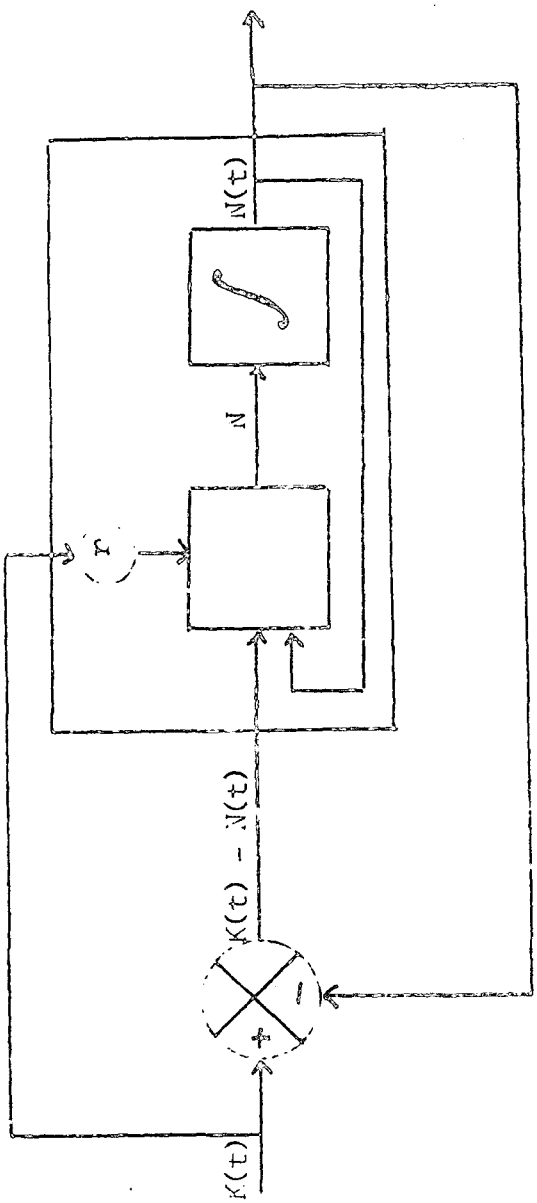


Diagrama de las principales vías de control y algunos de los procesos asociados en un ecosistema de pastoreo. Letras como en la Figura 1.

1 = limitación por "alimento"; 2 = manejo de la vegetación (corte, aplicación de herbicidas, etc.); 3 = manejo de herbívoros (manejo de ganado, aplicación de insecticidas, lucha biológica, etc.); 4 = manejo de carnívoros (aplicación de insecticidas, erradicación de parásitos, lucha biológica, etc.); 5 = limitación por ingestión (depredación, pastoreo, etc.); 6 = limitación por absorción; 7 = limitación por regeneración de nutrientes; 8 = arado, efectos secundarios de la aplicación de biocidas, etc.; 9 = fertilización, riego, etc.



...grama de control de una población que crece con una ley logística.

(...) = tamaño máximo de la población que se puede mantener en el am... instante t.

... intrínseca de crecimiento de la población.

.../dt = tasa de crecimiento de la población.

(...) = tamaño de la población en el instante t.