

• Estudi General

Teoría de los sistemas ecológicos

Ramon Margalef

Publicacions



UNIVERSITAT DE BARCELONA

U

B

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1	21
LA BIOSFERA	23
A. La cubierta viva de la Tierra	23
La biosfera en general.	23
Biomasa y flujos.	24
La polaridad de la biosfera.	27
El cambio regular y la respuesta a la perturbación.	29
Ecología planetaria: Peculiaridades de la Tierra.	29
B. Descripción abreviada de la Biosfera	34
Rasgos fundamentales y su expresión en tierras y mares.	34
El ecosistema pelágico.	37
El fitoplancton y su productividad.	39
Modelos conceptuales del fitoplancton.	43
Producción nueva y producción reciclada.	44
La organización del ecosistema pelágico depende de la energía exosomática.	46
Segregación o coexistencia de los componentes del fitoplancton.	49
El plancton animal.	51
El arrecife coralino como ejemplo culminante de bentos.	53
Fondos marinos blandos o desmenuzados.	55
Lo que el hombre obtiene del mar.	57
La superficie de los continentes.	58
El sistema de transporte vertical: exterior en el fitoplancton, interior en la vegetación terrestre.	64
El dominio afótico de los heterótrofos.	67
Plantas y animales bajo el sol.	68
Producción de los continentes.	69
Las aguas epicontinentales.	70

CAPÍTULO 2	77
SISTEMAS FÍSICOS Y ECOSISTEMAS	79
Algunas divagaciones previas sobre organización, sistemas y objetos.	79
Los ecosistemas en la biosfera.	84
Cuestiones cosmológicas: prólogo y posdata a toda ecología.	86
Materia, energía e información.	89
Generación de complejidad.	99
 CAPÍTULO 3	 105
CONSTRUCTIVIDAD FRENTE A LIMITACIONES	107
A. Energía y materiales	107
Los orígenes.	108
Materia, energía y cambio en los organismos y en la biosfera.	111
Elementos químicos y otros factores limitantes.	113
Regulación de las velocidades por la disponibilidad de recursos.	117
La necrosfera y la evolución de moléculas recalcitrantes.	119
B. Lo inevitable y lo útil	120
La adaptación expresada en relaciones métricas.	120
Regulación térmica.	125
Reglas térmicas.	126
Temperatura, dimensiones y alometrías.	128
Selección y normalización.	131
Persistencia de decisiones históricas.	133
C. Organización del espacio	136
La dimensión vertical.	136
Organización horizontal: Una acepción de la estabilidad.	139
Un estilo de construcción conveniente y generalizado.	142
Problemas prácticos en la detección de la estructura.	147
Energía externa y escala de los motivos de distribución.	151
Cómo incide el hombre sobre la organización del espacio.	152
Fronteras.	153
Actividad de los organismos.	156
Intercambio y transporte entre ecosistemas.	161
 CAPÍTULO 4	 163
LOS TEMAS DE LA TEORÍA ECOLÓGICA CLÁSICA	165
A. Interacciones entre especies	165
La teoría ecológica normal.	165
Las relaciones depredador-presa.	166
Formas de vida y estrategias.	170
Termodinámica e información en los sistemas binarios.	174

Índice	11
Cadenas y redes tróficas.	177
Parásitos y simbiosis.	179
Competencia.	182
Las relaciones intraespecíficas como modelos de competencia.	188
B. Complejidad	192
Organización de las relaciones entre especies.	192
Coevolución.	194
La diversidad.	198
Diversidad y estabilidad.	208
Conectividad.	209
C. Espacios ideales de representación	216
De los ciclos al caos.	216
Ciclos irreversibles.	218
El principio de Braun-Blanquet.	221
El espacio de comunidad.	223
Estructuras jerárquicas y de supuesta descendencia.	227
 CAPÍTULO 5	 231
EL DESARROLLO HISTÓRICO	233
A. Sucesión	233
La sucesión, fundamentada en la asimetría de los cambios.	233
El espectro de perturbaciones.	238
A propósito de la predicción.	241
Regularidades manifiestas en la sucesión.	242
Aproximaciones analíticas a la sucesión.	247
El impacto de la humanidad.	249
B. Evolución	251
Cuestiones que plantea la evolución global de la biosfera.	251
Cambio y evolución en los sistemas hechos de subsistemas repetibles y analogías entre ecosistemas y artefactos.	253
Estilos de vida favorecidos por la selección en las distintas etapas de la sucesión.	256
La evolución avanza adherida sobre la sucesión.	261
Los sistemas son represivos ¿Qué significa el progreso?	265
Implicaciones biogeográficas.	268
 BIBLIOGRAFÍA	 275

INTRODUCCIÓN

Ocuparse de Ecología lleva a preocuparse por el contenido y límites del tema y por la coherencia intelectual del mismo. Si se medita sobre las relaciones entre las cuestiones más fundamentales, o las más comentadas, cada uno puede llegar a una imagen personal, probablemente herética, de lo que es la Biosfera. Este autor lo intenta ahora por tercera vez, tras *Perspectives in ecological theory* (1968) y *La Biosfera, entre la termodinámica y el juego* (1980), habiendo cambiado frecuentemente de opinión, entre un libro y otro, aunque seguramente mucho menos en las cuestiones fundamentales. Este libro podría servir de introducción al estudio de la Biosfera, si no fuera demasiado teórico y con una visión personal del tema, que no se ha querido hacer demasiado neutra. Se aparta de presentaciones más corrientes en que se da mayor énfasis a los procesos de autoorganización y a la inevitabilidad del cambio histórico. Parece que una vez aceptadas la evolución y la sucesión, ni las especies pueden permanecer sin evolucionar ni los ecosistemas sin manifestar sus tendencias al cambio. Aparte de esta visión sesgada de la naturaleza, se espera que la mayor parte del texto refleje el estado actual de la Ecología de manera no peor que cualquier manual al uso.

El examen de entidades tan grandes y complicadas como la entera cubierta viva de nuestro planeta suscita inevitablemente cuestiones filosóficas. La raíz del problema yace en la aspiración de una parte pequeña de este sistema total —pues como «sistema» organizado ha de tratarse, lo cual es ya una primera petición de principio— de abarcar el sistema más amplio del que forma parte. Una prueba válida para alguien sería preguntarse si se encuentra feliz o no dentro del sistema global, o bien sospechar que la regularidad que observa en su propia mente no es ajena al funcionamiento de la máquina más general, o, como escribió Einstein, que lo más sorprendente de este mundo es que nos aparezca inteligible. Consideraciones como ésta se han aplicado especialmente al desarrollo de la física basada en la matemática. La matemática tiene una característica especial, en el sentido que parece que en sus dominios se descubre algo que estaba ahí desde el inicio de los tiempos, que tiene carácter prehumano. Puede ser comparable al *a priori* kantiano, lo que vendría dado, preculturalmente, como fruto de la evolución por selección y puede reflejar más el «cableado» del sistema nervioso que información adquirida. Más allá, o más acá, de la matemática y con referencia a sistemas organizados y autoorganizados, las dificultades de anticipación y aun de explicación rigurosa son mayores. El terreno donde se sitúan las cuestiones de

indeterminación, sistemas caóticos, etc., sigue siendo de actualidad, aunque no sabemos qué es lo que finalmente traerá.

Consideraciones en la línea de las exteriorizadas por Einstein acuden inevitablemente a la mente, algo menos frecuentemente a la pluma, al tratar de la morada global de la especie humana, y conducen a debatir, con su origen, su percepción, actividades y consecuencias de las mismas dentro de un sistema natural que abarca toda la escala de complicaciones posibles. No podemos limitarnos a decir que en el sistema disipativo de energía en el que estamos inmersos —que podemos limitar al centrado en el Sol— han aparecido de algún modo y que sobre él se han intensificado una serie de irregularidades o perturbaciones, montando unas sobre otras hasta dar la naturaleza actual con toda su complicación —y su belleza. Es provechoso intentar una aproximación matemática formal a las situaciones elementales idealizadas; pero se puede esperar poco éxito al enfrentarnos con sistemas históricos de gran complejidad, cuya posible reducción a modelos tratables no se ve clara.

La historia de la vida se describe satisfactoriamente y se entiende parcialmente sobre la base de la selección natural, que hay que extender a todos los sistemas hechos de subsistemas repetidos o reproducibles, lo cual es un rasgo general en la construcción de la naturaleza. Cualquier forma que pueda darse a lo que se ha dado en llamar «principio antrópico», que vería en la aparición de nuestra especie una clave para la interpretación del mundo, tropieza con considerables dificultades a nivel filosófico. Recuerda al ingenuo descubrimiento de que los ríos tienen tendencia a pasar por las ciudades. Claro es que se le puede dar una forma inocua diciendo que sólo han de ser contados los universos que finalmente han dado organismos capaces de reflexión, a través de los cuales el sistema entero toma conciencia de sí mismo.

Es posible presentar un argumento equivalente, al que se puede depurar de las adherencias filosóficas indeseables, en forma de un principio variacional. Este principio tiene su forma más conocida en la expresión de Fermat, acerca de la trayectoria que describe un rayo de luz a través de medios de distinta refringencia, donde su velocidad es diferente: la trayectoria efectiva es aquella que minimiza el tiempo invertido en recorrerla. Dentro de la Ecología, un principio análogo se podría aplicar a los procesos de sucesión que se organizarían y combinarían de tal manera que se haría mínimo el tiempo idealmente necesario para alcanzar un estado de mínima tasa de renovación (mínimo P/B , o mínimo $P/(B+N)$ (P , producción o flujo de energía; B , biomasa; N , necromasa). Puestos a aceptar algo que se parece a un «principio antrópico» yo diría, a lo más, que la evolución de un universo sigue el camino que conduce lo más rápidamente posible a cerrarse sobre sí mismo, desarrollando la capacidad de reflexión: el universo acaba contemplándose el ombligo. Hay argumentos para complementar de manera más convincente aquella descripción abreviada de la sucesión. No es ajeno a esta forma de enfocar el problema el ver en la evolución cultural un modo de ganar la carrera a la evolución genética («Build for speed, not for comfort», en frase de Richerson y Boyd, 1990, aplicada a la cultura).

Debemos construir la ciencia sobre la reflexión. Cualquier ejercicio de cons-

trucción intelectual pasa por un número indefinido de recursiones. Podemos vernos como partes conscientes del universo, contemplando en torno a nosotros, y también imaginarnos que contemplamos a alguien o a nosotros mismos considerando el resto del universo, y así sucesivamente. Todo esto son pensamientos triviales que a todos se nos han ocurrido, pero que conviene repetirlos, en parte porque se relacionan con la intuición de las derivadas sucesivas y también porque facilitan reconocer distintos niveles superpuestos. Lo que aparece como perturbación dentro de un nivel, es decir, algo inesperado desde dicho nivel, puede ser asimilado en un esquema explicativo centrado en un nivel superior, al ampliar, naturalmente, el marco espacio-temporal de la ventana de observación. Toda paradoja tiene un marco más amplio donde encuentra explicación. Además, pensar en la contemplación de la propia mente cuando se contempla el Universo, facilita aceptar la validez de una experiencia compartida con otros semejantes.

Tratando de llevar la reflexión a distintos niveles, cosas que a primera vista parecen anomalías inexplicables se acaban entendiendo, o por lo menos se aceptan. Entre las relaciones nuevas que se descubren, unas se entienden como simples consecuencias de la ampliación del sistema inicial; pero otras son novedades, lo que nos convence de que vivimos en un universo abierto en el que todavía cualquier cosa es posible. Esta percepción progresivamente ampliada de los sistemas puede influir en el desarrollo, apoyado en las modernas facilidades de lógica y cálculo, de muchos modelos de lo que se llama «inteligencia artificial», que con una chispa de la divina capacidad de olvidar nos pueden ayudar a entender la eficacia de los sistemas ecológicos de la biosfera.

La prudencia más elemental nos lleva a pensar que una porción pequeña del sistema —más tarde se tratará de definir lo que es un sistema— no puede «entender» completamente el sistema entero del que forma parte. La discusión podría llevarnos a examinar si se puede creer que hay sistemas complicados que tienen en su interior réplicas en las que hay información latente de todo el sistema y que eventualmente podrían reconstruirlo. Este pensamiento le viene naturalmente al biólogo al contemplar la enorme potencialidad del mensaje genético, que incluye también información en potencia que ahora no se actualiza. La disquisición viene a cuento del grado de fiabilidad de nuestro organismo para «adquirir un conocimiento» del sistema más amplio en el que estamos inmersos. Nuestra evolución biológica e incluso nuestra vida individual han recibido o han podido recibir mucha información del entorno. Si se piensa que nuestro cerebro es producto de la selección natural, hay que creer que se encamina a garantizar la supervivencia, pero no el conocimiento. Sin duda el conocimiento contribuye en algo a la supervivencia. Así se puede suponer porque somos organismos que viven relativamente bastante tiempo, con una considerable capacidad de desplazamiento y flexibilidad de regímenes de vida.

Es prudente no fiarse demasiado de la capacidad de nuestra «máquina de pensar». Aunque no sea del todo pertinente recordarlo aquí, no sabemos nada realmente importante acerca de la memoria. Nuestro procesador particular funciona fundamentalmente de manera lineal —el hilo del pensamiento—, lo cual tiene su consecuencia —o su causa— en el lenguaje y en la lógica lineal. Un

organismo social y adoctrinable como el hombre dispone de un repertorio vastísimo de mecanismos mentales que tienen más que ver con asegurar una posición en la sociedad que con conocer el mundo externo, conocimiento que puede perder relevancia cuando la sociedad, como la nuestra, es tan poderosa que puede permitirse ignorar muchas fuentes externas de estímulos naturales.

Otras consideraciones pueden ser más positivas. La práctica de la ciencia ha conducido a reconocer que es muy apreciable la combinación de los elementos de observación, empezando por nuestros sentidos y terminando con los aparatos más costosos, y compensar con buen sentido los errores inherentes a los mismos. Con palitos y cordeles se puede desarrollar una astronomía aceptable, las deformaciones de los artefactos se pueden corregir combinando metales de diferente coeficiente de dilatación, etcétera. La sagacidad que está detrás de experimentos relativamente simples, usando equipo barato, como el cordel y el lacre caros a Rutherford, puede inspirar criterios equivalentes, no solamente en la crítica al uso de nuestros sentidos o de los aparatos considerados como órganos exosomáticos o prolongación de nuestro cuerpo, mas también en nuestro raciocinio.

Las líneas anteriores harían sonreír a los filósofos de la ciencia o de la metaciencia. Es bueno que alguna vez desarruguen el ceño; pero la verdad es que la epistemología científica continúa con los mismos problemas de siempre. Creo que hay que mantener una sana desconfianza frente a las recetas que definen lo que es la ciencia ortodoxa y la forma correcta de practicarla. Hay mecanismos que funcionan mejor de la forma más simple y es inoportuno encorsetarlos con demasiadas reglas. Reglamentar el paso espontáneo de marcha no ha producido más que el ridículo paso de la oca. El interés por la naturaleza lleva consigo cierta racionalidad que hace perder el interés por sutiles distinciones entre lo que es ciencia y lo que no lo es. Escribir de esta manera atestigua simpatía indudable, aunque no total, por Feyerabend. Actualmente, todavía se llevan tanto la aproximación «clásica» que acepta discontinuidades en la evolución de la ciencia (cambio de paradigmas) como la fe en el progreso basado en la refutación de hipótesis probadas falsas, con la aceptación provisional de las que, por el momento, no pueden rechazarse de manera convincente. Este punto de vista, preconizado especialmente por Popper, es conmesurado con la visión de un universo abierto, en el que nuestra percepción siempre será provisional, por lo que tenemos que estar siempre dispuestos a modificarla. Creo que no se puede definir una aproximación ortodoxa a la ciencia. Ciertamente está sometida a la selección natural, y puesto que la vida es un experimento inacabado, como destaca un libro de Luria, la ciencia de la vida es un conjunto de supuestos que nunca se pueden probar de manera completa, aunque nunca se puede saber, y la decisión queda para mañana. Hay razones para creer (esperar) que la acumulación de conocimiento sigue una regularidad semejante a la «ley» de rendimientos decrecientes, formulada en economía; pero usada de modos diversos en ecología (por ejemplo, en el uso de la expresión de Michaelis-Menten). El conocimiento relativo adquirido es mayor durante las primeras fases de aproximación a un problema. Por otra parte, el hombre —y sus antepasados— han interactuado con la naturaleza durante mucho

tiempo, y no se puede pensar que, después de una supervivencia tan prolongada, el resultado haya sido una incapacidad total para entenderla.

El problema de probar las hipótesis propuestas ha dado un nuevo respiro a la forma peculiar de la estadística más practicada en ecología e incluso ha aumentado su clientela. Los problemas especialmente importantes y complicados se muestran recalcitrantes ante la tarea de explicitar claramente distintas hipótesis asociadas que se puedan probar separadamente. No es siempre fácil encontrar buenas hipótesis nulas para tomar como referencia y se dispone de un amplio repertorio de pruebas de significación entre las que escoger. Se pasa con demasiada facilidad de ejemplos de «piensos y cerdos» a «luz y diatomeas», con cierto olvido relativo de las propiedades de los sujetos. Se ve como indeseable todo lo que crea dificultades para la estabilización de la variancia y, por tanto, se contemplan con poca simpatía los fenómenos de tipo histórico que incluyen un aumento de la complejidad, como la diversidad y la sucesión, que se podrían beneficiar de una aproximación cuantitativa más correcta. Tanto la estadística como el uso de ordenadores y la modelística al uso basados en ellos, tienen que estar al servicio de la Ecología, pero no tratar de imponerle su construcción teórica o la inercia que conllevan.

Cualquier consideración de la ecología teórica conduce a enfrentarse con el dilema o conflicto entre ecología reduccionista y ecología holística, que viene a ser una indigestión mental crónica. La ecología «reduccionista» prefiere quedar más cerca de los datos de observación o de las medidas originales y hace un amplio uso de la estadística elemental. El holismo, según una palabra inventada por el general surafricano J.C. Smuts (1870-1950), se refiere a centrar el punto de vista sobre el conjunto y se suele justificar diciendo que el conjunto es mayor que la suma de sus partes, lo cual es dudoso o sólo válido como recurso retórico.

Hoy día buena parte de la ecología tradicional está quedando casi aplastada entre dos versiones más poderosas de la misma ciencia: por una parte, el acopio de datos básicos, en pequeños proyectos de investigación, encuentra cierta facilidad tanto en su financiamiento como para la publicación de los resultados. Por otra parte, asistimos al desarrollo de una ecología planetaria o global, motivada por temas como el efecto invernadero, la destrucción de la Amazonía, el «agujero en la cubierta de ozono» o los vertidos de petróleo, promocionados por entidades con muchos recursos, como son necesarios para organizar la vigilancia del planeta. Creo que la ecología tradicional se está descomponiendo en un mosaico de hipótesis, unas interesantes, otras menos, algunas contradictorias e incluso frívolas. Mientras que la mayor parte de las ciencias han pretendido ahondar en sus fundamentos, la ecología se ha poblado de conceptos, hipótesis, raramente teorías, que suelen conservarse desconectadas unas de otras. Un ecólogo a la antigua lamenta tanto la falta de superestructura teórica común, como la progresiva desvalorización del punto de vista naturalista.

Actualmente, la ecología goza de gran predicamento en los medios de comunicación y en la propaganda política. Los resultados son mixtos: no vale aquello de que, bien o mal, lo importante es salir en los periódicos. Mucho esfuerzo y dinero se han invertido en estudios ambientales de calidad muy dudosa y cuyos

resultados, además —no sabemos si hay que añadir afortunadamente— suelen permanecer archivados. Es difícil conseguir un seguimiento regular de todos los cambios, después de haberse hecho una evaluación inicial del impacto ambiental. Probablemente la ecología no ha sabido sacar provecho del maná que le ha caído del cielo, por lo que a los cultivadores de la ciencia les alcanza una considerable responsabilidad. Conviene aceptar plenamente todas las presiones sociales y comprender que los problemas específicos de la humanidad piden integrarse en una visión ecológica más general. Sin ir más lejos, la percepción del límite superior en un proceso de crecimiento, aunque haya sido torcidamente interpretado en la práctica de los modelos matemáticos, es importante como señal para desencadenar procesos de regularización o de retroalimentación en general. Las nociones de energía exosomática y de artefactos exosomáticos, estrechamente relacionados con la organización del espacio, sin ser privativos de la especie humana, son las que convierten a dicha especie en un factor fundamental de organización —o desorganización— de la biosfera.

Las páginas siguientes intentarán desarrollar una concepción teórica donde enmarcar una visión personal de lo que se sabe del funcionamiento y aspecto de los sistemas ecológicos, que van desde los individuos de diferentes especies hasta el conjunto de todos ellos dentro de áreas más o menos amplias, y tratando también de su encadenamiento en el tiempo. La biosfera es la cubierta viva del planeta y abarca a todos los organismos vivos, su soporte y las señales de su actividad. Las características de la Tierra como planeta, sus materiales, las disponibilidades de energía, sirven de marco a la biosfera. Todas las piezas del rompecabezas están diversamente trabadas. Su examen conduce a una visión organísmica e histórica, que acepta una fuerte dependencia del entorno físico, el cual, a su vez, está modulado fuertemente por la existencia de la vida. Puesto que hasta la fecha sólo se conoce vida en nuestro planeta, la mayor parte de las hipótesis que podemos plantearnos no se podrán probar de manera efectiva, aunque no creo que de esto se tenga que concluir que sea vano el deseo de construir una ciencia ecológica que fuera aplicable a cualquier planeta.

Quizá haya muy pocas «leyes de la naturaleza» y, en su mayoría, tendrán el carácter de principios de impotencia. Dos cosas no pueden ocupar el mismo espacio y, generalmente, hay una concatenación de causas y efectos que hace que no puedan ocurrir simultáneamente. Una misma energía no se puede utilizar de la misma manera dos veces seguidas, etcétera. Esto no es privativo de la naturaleza física; la construcción de la sociedad se fundamenta más bien en lo que no debe hacerse. Lo más importante en la naturaleza y especialmente en la vida es su constructividad: la tendencia a complicar estructuras coherentes o en continuidad, a lo que, de manera demasiado, aunque necesariamente, vaga, hay que ver como la tendencia a aumentar la información, tanto más cuanto que está potenciada por la constante presión de selección a favor de estructuras más amplias con comportamiento unificado, en cuyo seno el valor de la información se multiplica o potencia a sí misma. La recuperación, bajo la forma de información, de una parte de lo equivalente a la entropía producida en el sistema y en su entorno, explica la mayor parte de las propiedades de la vida, de los organismos y de los ecosistemas. Sobre

la base de esta creencia se desarrollará el texto. Relaciones parecidas son indudablemente válidas en el interior de los organismos; pero es necesario trazar una demarcación y prescindir de tratar de la estructura de los individuos. Es decir, mantenerse en el terreno que media entre el organismo individual y el planeta entero.

Se pone un énfasis especial en intentar caracterizar organismos y ecosistemas como sistemas físicos, lo que obliga a fijarse en las propiedades de los sistemas en general, especialmente en la autoorganización que dio un gran paso, no necesariamente unido al origen de la vida o de los organismos, al adoptar sistemas formados por subsistemas replicables. Los ecosistemas, examinados a la luz de los principios físicos, integran materiales y subsistemas vivientes e inanimados, cuya interacción es evidente en los ciclos materiales y en la historia de la biosfera, en el papel de la energía exosomática o externa y en la aparente indeterminación que entra en cualquier mecanismo cuando alcanza un campo de energía relativamente baja, o, por lo menos, de diferencias pequeñas de energía. La extraordinaria capacidad de hacer cosas nuevas brota de las restricciones impuestas por las pocas leyes físicas identificables. Posiblemente las que se relacionan con la termodinámica son las más constructivas y las únicas que pueden servir de base a la predicción. Sin embargo, los intentos de predicción en ecología han resultado poco adecuados y suelen basarse en postular la regularidad de ciclos basados en algún sistema mecánico —movimientos de astros, osciladores biológicos.

Insisto: si se me pidiera una definición muy breve e inmediata de la vida, diría que es un sistema físico que ha resultado particularmente eficaz en recuperar en forma de información, una parte considerable de lo que permitiría el aumento de entropía experimentado en el organismo y en su entorno inmediato. Esta información se invierte en canales, códigos y confiere cierta capacidad de anticipación. Generalmente acaba aumentando aún más la complejidad local de la naturaleza, y hay que notar que este hecho fundamental, el aumento de complejidad, suele estar ausente de la mayor parte de las consideraciones en torno a la evolución biológica, tal vez porque —inconscientemente— se da por supuesto. La selección natural es importante, pero más importante es su fundamento: la existencia de sistemas dotados de la capacidad de copiar o reproducir sus propios subsistemas. Para la mayoría de los biólogos, el éxito del individuo que ha sido capaz de hacer pasar una copia de sus propios genes a una generación inmediata es una explicación suficiente de las «maravillas de la naturaleza» y, por favor, no hagan más preguntas. Pero es casi inevitable pensar en otros aspectos importantes: las propiedades del universo físico condujeron desde los albores de la vida a organizarla en forma de paquetes discontinuos (individuos), introduciendo una serie de condiciones para su coexistencia y evolución. La supervivencia de las formas orgánicas depende de todas estas circunstancias y, fundamentalmente, de la capacidad de copiar la información de manera muy barata, y de la posibilidad de enriquecerla continuamente, al actuar en el seno de sistemas capaces de recuperar información a partir del aumento de entropía necesariamente unido a su funcionamiento. La evolución queda frenada en el seno de los sistemas muy complicados, hasta que simplificaciones debidas a perturbaciones externas, imposibles de prever, liberan

muchas potencialidades ocultas y abren posibles vías a nuevas exploraciones.

La presentación se ha distribuido en cinco capítulos. En el primero se describe sinópticamente la biosfera, fijándose en los rasgos comunes de organización que se descubren en los distintos ecosistemas y en la forma como se relacionan unos con otros a través de los ciclos globales. El segundo capítulo es el más especulativo y no es necesario tratar de entenderlo para seguir adelante, aunque el autor cree que es importante. Los ecosistemas son sistemas físicos, y reconocerlo puede ayudar a unificar la ciencia. El tercer capítulo da algunos ejemplos de cómo la vida usa propiedades fundamentales y uniformes de la materia en su generación de organización: a veces las propiedades más elementales y generales encuentran utilización directa, a veces la evolución ha conseguido crear mecanismos que producen resultados contra lo esperado. En el capítulo cuarto se examinan varios temas clásicos de la teoría ecológica contemporánea, referentes a la interacción entre individuos de diferentes especies y a las regularidades que puede manifestar la combinación de un gran número de semejantes interacciones. El último capítulo insiste en cómo se puede ver la asimetría del tiempo en los distintos niveles de los ecosistemas, expresada fundamentalmente en la ruptura entre autoorganización y respuesta a la perturbación.