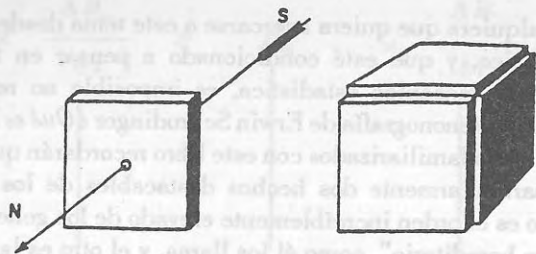


Permítanme explicar brevemente qué significa decir que un sistema autoorganizador se alimenta de ruido, usando un ejemplo casi trivial, aunque divertido.

Supongamos que consigo un gran pliego de material permanentemente magnetizado que está fuertemente magnetizado en forma perpendicular a la superficie, y que recorto de este pliego un gran número de pequeños cuadrados (figura 3a).



(a) Cuadrado magnetizado

(b) Cubo, familia I

Figura 3

Luego pego estos pequeños cuadrados a todas las superficies de pequeños cubos hechos de material liviano, no magnético, del mismo tamaño que los cuadrados (figura 3b). De acuerdo a qué lados de los cubos elijamos para que tengan el polo magnético apuntando para el lado de afuera (familia I), podemos producir diez tipos diferentes de familias de cubos, tal como se indica en la figura 4.

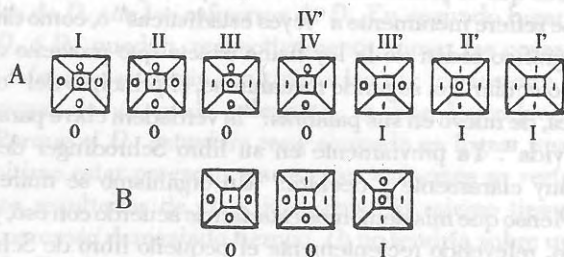


Figura 4. Diez familias diferentes de cubos.

Supongamos ahora que tomo un gran número de cubos, digamos, de la familia I, que se caracteriza por tener todos los lados con el polo norte apuntando hacia afuera (o de la familia I', con todos los polos sur), los pongo en una gran caja que está también llena de pequeñas bolitas de vidrio, de modo tal que hago deslizarse a los cubos por fricción, y empiezo a sacudir la caja. Por cierto nada demasiado espectacular va a pasar: desde el momento en que los cubos se repelen unos a otros, tenderán a distribuirse en el espacio disponible de modo tal que ninguno de ellos se acerque demasiado a algún otro cubo. Si al poner los cubos en la caja no se siguió ningún principio ordenador, la entropía del sistema permanecerá constante o, como máximo, aumentará una pequeña cantidad.

Supongamos ahora, para hacer este juego un poco más divertido, que reúno ahora una población de cubos en la cual sólo la mitad de los elementos son miembros de la familia I (o I'), mientras que la otra mitad

son miembros de la familia II (o II'), caracterizada por tener sólo un lado de diferente magnetismo apuntando hacia afuera. Si esta población es puesta en mi caja y continúo sacudiéndola, es claro que aquellos cubos con sólo un polo diferente apuntando hacia afuera tenderán, con una probabilidad aplastante, a emparejarse con miembros de la otra familia, hasta que mis cubos estén casi totalmente emparejados. Dado que las probabilidades condicionales de encontrar un miembro de la familia II, dado el lugar de un miembro de la familia I, han aumentado mucho, la entropía del sistema ha disminuido, de ahí que tengamos más orden después de sacudir la caja que antes. Es fácil demostrar que en este caso la cantidad de orden en nuestro sistema ascendió de cero a

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\log_2(en)}$$

si uno comenzó con una densidad de población de n cubos por unidad de volumen.

Les garantizo que este aumento en el orden no es para nada extraño, especialmente si la densidad de población es alta. Tomemos entonces una

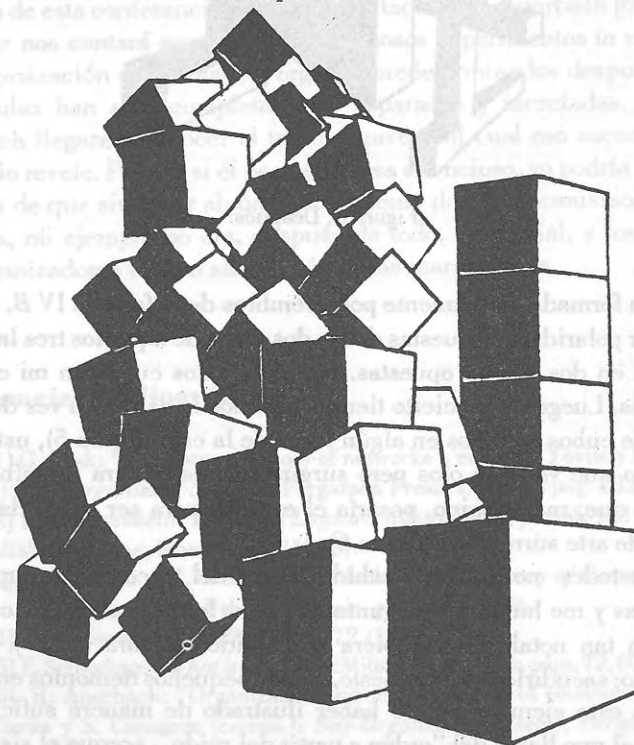


Figura 5. Antes.

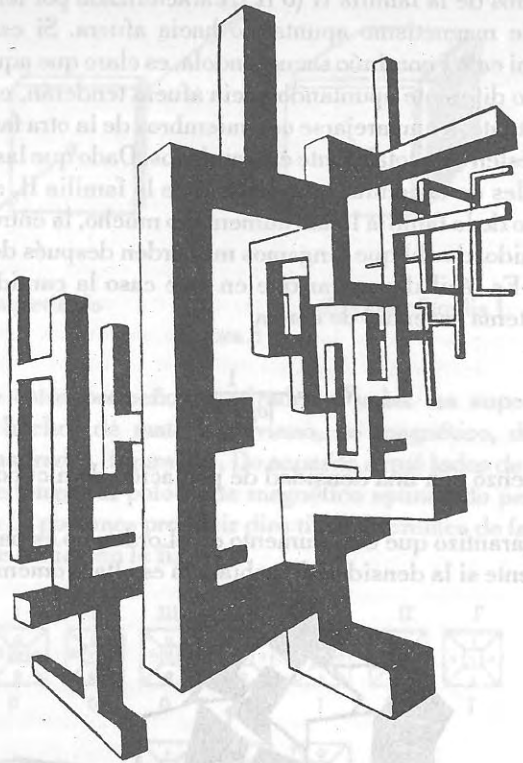


Figura 6. Después.

población formada enteramente por miembros de la familia IV B, caracterizada por polaridades opuestas de los dos pares de aquellos tres lados que se juntan en dos puntas opuestas. Ponemos estos cubos en mi caja y la sacudimos. Luego de un cierto tiempo abrimos la caja y en vez de ver un montón de cubos apilados en algún lugar de la caja (figura 5), ustedes no crearán lo que ven sus ojos pero surgirá una estructura increíblemente ordenada que, me imagino, pasaría el examen para ser exhibida en una muestra de arte surrealista (figura 6).

Si ustedes no hubieran sabido acerca del truco de las superficies magnéticas y me hubieran preguntado qué es lo que puso a los cubos en ese orden tan notable, yo hubiera mantenido mi cara seria y hubiera contestado: sacudirlos, por supuesto, y unos pequeños demonios en la caja.

Con este ejemplo espero haber ilustrado de manera suficiente el principio al que llamé del "orden a partir del ruido", porque el sistema no

fue alimentado con ningún orden, sino tan sólo con barata energía no dirigida; sin embargo, gracias a los pequeños demonios en la caja, sólo fueron seleccionados, a largo plazo, aquellos componentes del ruido que contribuían al aumento del orden en el sistema. La ocurrencia de una mutación, por ejemplo, sería una analogía pertinente si las gametas fueran los sistemas considerados.

Así es como yo nombraría dos mecanismos como claves importantes para la comprensión de los sistemas autoorganizadores, uno al que llamaría el principio del "orden a partir del orden", como sugirió Schrodinger, y otro al que llamo principio del "orden a partir del ruido". Ambos requieren la cooperación de nuestros demonios, que son creados junto con los elementos de nuestro sistema, y se manifiestan en algunas de las propiedades estructurales intrínsecas de estos elementos.

Podría ser acusado de haber presentado un caso casi trivial con la intención de desarrollar mi principio del orden a partir del ruido. Estoy de acuerdo. Sin embargo, estoy convencido de que si no hubiera confesado mi pequeño truco de las superficies magnetizadas, hubiera mantenido una posición mucho más sólida. Por tanto, estoy muy agradecido a los patrocinadores de esta conferencia por haber invitado al Dr. Auerbach [6] que más adelante nos contará acerca de sus hermosos experimentos *in vitro* sobre la reorganización de células en órganos predeterminados después de que las células han sido completamente separadas y mezcladas. Si el Dr. Auerbach llegara a conocer el truco a través del cual eso sucede, espero que no lo revele. Porque si él permaneciera silencioso, yo podría recuperar mi tesis de que sin tener algún conocimiento de los mecanismos comprometidos, mi ejemplo no era, después de todo, tan trivial, y los sistemas autoorganizadores siguen siendo aún cosas maravillosas.

Referencias bibliográficas

- [1] G. Pask: "The natural history of networks", en M. C. Yovits y S. Cameron (comps.): *Self-Organizing Systems*, Pergamon Press, Londres, pág. 232 (1960).
- [2] L. Wittgenstein: *Tractatus Logico-Philosophicus*, párrafo 6.31, Humanities Publishing House, Nueva York (1956).
- [3] C. Shannon y W. Weaver: *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana, Illinois, pág. 25 (1949).
- [4] W. Heisenberg: *Z. Phys.* 43, 172 (1927).
- [5] E. Schrodinger: *What is Life?*, MacMillan, Nueva York, págs. 72, 80, 82 (1947).
- [6] R. Auerbach: "Organization and reorganization of embryonic cells", en M. C. Yovits y S. Cameron (comps.): *Self-Organizing Systems*, Pergamon Press, Londres, pág. 101.