



## Revista Andaluza de Medicina del Deporte

Rev Andal Med Deporte. 2010;3(1):13-22

www.elsevier.es/ramd



### Revisión

## Los sistemas complejos y el mundo del deporte

J.M. García-Manso<sup>a</sup>, J.M. Martín-González<sup>b</sup> y M.E. Da Silva-Grigoletto<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Educación Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria. España.

<sup>b</sup>Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria. España.

<sup>c</sup>Centro Andaluz de Medicina del Deporte. Córdoba. España.

#### Historia del artículo:

Recibido el 31 de agosto de 2009.

Aceptado el 5 de octubre de 2009.

#### Palabras clave:

Ciencias del deporte.

No-linealidad.

Comportamiento caótico.

### RESUMEN

En el campo del deporte y del entrenamiento deportivo, un terreno particularmente multidisciplinar, pocos trabajos se han hecho hasta el momento desde la óptica de los sistemas complejos. Tampoco el mundo de la medicina ha asumido de forma sólida esta forma de entender el mundo. La tradicional visión del deporte y de las ciencias que lo alimentan es simple y siempre realizada desde un punto de vista lineal del mundo. Un fenómeno es lineal si la respuesta es proporcional al estímulo. Tratamos en este trabajo de plantear nuestro entorno desde el principio de la no-linealidad, del comportamiento caótico y de la interconexión de los procesos y los sucesos. Entendemos que esto nos ayudará a mejorar la idea que tradicionalmente nos determina la estructura del deporte y su propia lógica interna.

© 2009 Revista Andaluza de Medicina del Deporte.

#### Keywords:

Sport sciences.

Non-linearity.

Chaotic behavior.

### ABSTRACT

#### Complex systems and the sports world

In the sports and the sports training fields, an especially multidisciplinary area, only a few works have been made so far from a complex systems standpoint. Neither has the medical world solidly attained this way of understanding the world. The traditional view of sports and the sciences that nurture it, is simple and always performed from a lineal standpoint. A phenomenon is only considered lineal if the response is proportional to the stimulus. In this paper, we try to outline our environment from the non-linearity principle, the chaotic behavior, and the interconnection of processes and events. We understand this might help improve the idea that has traditionally determined the structure of sports and its own internal logic.

© 2009 Revista Andaluza de Medicina del Deporte.

#### Correspondencia:

J.M. García-Manso.

Campus Universitario de Tafira, s/n.

Edificio de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte.

35017 Las Palmas de Gran Canaria. Gran Canaria.

Correo electrónico: jgarcia@def.ulpgc.es

## Introducción

Las actuales ciencias de la complejidad no dejan de ser una amalgama de métodos, modelos y metáforas procedentes de una gran variedad de disciplinas diferentes. Las herramientas que utiliza esta nueva forma de abordar y observar el mundo incluyen conceptos y técnicas de disciplinas como la física, las matemáticas, las simulaciones numéricas y el análisis numérico, los procesos estocásticos y la teoría de las fluctuaciones, así como la teoría del control y otras herramientas provenientes de la ingeniería o la informática. Tal situación en ocasiones genera errores de interpretación entre aquellas personas que tratan de acercarse al estudio de la complejidad sin una formación suficiente. Tampoco parece ser de gran ayuda la considerable literatura existente sobre sistemas complejos que abarcan las matemáticas puras o aplicadas, la física, la biología, la medicina, las ciencias sociales, económicas, etc. Por tal motivo, se hace cada vez más necesario un trabajo de tipo multidisciplinar que aúne conceptos y unifiquen criterios<sup>1</sup> (Comité Olímpico Español [COE]).

Sin embargo, lo peor de la situación actual quizá sea la falta de un "lenguaje" común que impide que especialistas en un campo puedan acceder a los resultados procedentes de otros, lo que dificulta la comunicación.

La realidad es que no hay una definición totalmente aceptada de lo que es un sistema complejo<sup>2-4</sup>. De hecho la palabra complejidad, que pertenece al lenguaje común, se puede confundir con términos como complicado, numeroso, difícil, etc.

En el campo del deporte y del entrenamiento deportivo, un terreno particularmente multidisciplinar, se han hecho, hasta el momento, pocos trabajos rigurosos desde esta particular manera de ver la realidad<sup>5</sup>. Tampoco el mundo de la medicina ha asumido de forma sólida esta forma de entender el mundo.

El presente trabajo tiene como fin presentar y desarrollar algunos de los conceptos que, con mayor frecuencia, se manejan en la actualidad, y en los que existe bastante consenso.

## La organización de los sistemas complejos: reflexiones

Los sistemas complejos son estructuras que se componen de *varios elementos*, normalmente numerosos, cuyas *relaciones* son *no lineales*<sup>6</sup>. Este quizás sea uno de los conceptos más fáciles de aceptar y comprender en nuestro campo.

Las reglas en el deporte son *aparentemente* muy simples. Los atletas tratan de correr más rápido, saltar más alto o lanzar más lejos. En el golf se trata de introducir una pelota en un agujero golpeándola con un palo. En el fútbol hay que mover un balón sin tocarlo con las manos, salvo el portero, hasta introducirlo dentro de una portería de varios metros de anchura.

No obstante, hay que tener cuidado pues siempre aparecen reglas adicionales que *complican* el desarrollo del juego. Por ejemplo en el fútbol no se puede salir del rectángulo en el que se juega; no puede haber ningún jugador en la posición que el reglamento denomina *fuera de juego*; no se puede tocar al contrario y poco más; lo mismo podríamos decir de los demás deportes.

Incluso, todos sabemos que el fenómeno deportivo visto de esta manera no explica la trascendencia que tiene en la actualidad. Cuando se hace una reflexión simplista de este extraordinario fenómeno social, sólo estaremos ante una visión lineal del deporte con independencia de la manifestación a que hagamos referencia (competición, entrenamien-

to, organización, etc.)<sup>5</sup>. Sería como el proceder de unos aficionados para los que jugar al fútbol no es más que hacer un poco de ejercicio, o para los que jugar al golf es pasar un día relajándose en el campo. Por supuesto, en este tipo de actividades no haría falta la figura del árbitro, la elaboración de un reglamento tan concreto como el que se tiene para cada modalidad, ni sería necesario crear una estructura organizativa tan rígida y costosa como la que existe en cada federación deportiva.

La anterior visión del mundo deportivo es simple, sin color y sin pasión, es un punto de vista lineal del mundo. Un *fenómeno es lineal* si la respuesta es proporcional al estímulo. Así, golpear una pelota es, en primera aproximación, un proceso lineal, ya que cuanto más fuerte se golpea más velocidad se obtiene. La regla de lo lineal es la regla de la proporción, la regla de tres: *si un cm en el mapa son 10 km en la realidad, si mido 20 cm tendré 20 X 10 = 200 km. ¿Pero es aplicable a otras cuestiones importantes en el deporte? Pensemos: si el metabolismo basal de una especie animal que pesa 1 kg consume una cantidad X energía, ¿el que pese el doble consumirá el doble? Si con un músculo de sección transversal (CSA) X desarrollo Y newtons de fuerza ¿con el doble de sección desarrollará el doble? Para un comportamiento lineal, estas preguntas tendrían respuestas inmediatas, pero en la realidad las cosas no son tan sencillas.*

Todos sabemos que lo verdaderamente interesante en el deporte está en la competición y por tanto: *tengo que correr más, pero más que los que corren a mi lado; tengo que introducir la bola en el agujero pero dando menos golpes que los otros; tengo que hacer gol, pero tengo delante uno rivales que tratarán de impedirlo por todos los medios. Así, este por todos los medios hace necesario regular el contacto entre jugadores, lo que lleva a la definición de normas y a crear la figura del árbitro. También provoca el desarrollo de toda una serie de estrategias y tácticas que permiten apurar al máximo tales normas. Esto lleva a que, en el deporte de alto nivel, se juegue casi siempre en una zona crítica<sup>5,6</sup>, bordeando el límite entre lo legal (orden) y lo que no lo es (caos), ajustando los golpes al máximo, arriesgando en la forma de juego, etc.*

Además, como el sistema no es completamente justo, ya que depende de lo que decida un árbitro, del estado en que se encuentre el terreno de juego, de la motivación de los jugadores, etc., la cosa se complica. Quizás aquí esté la clave del gran espectáculo y del enorme atractivo que, para gran parte de la población, tiene el deporte. Los factores condicionantes y el peso de los mismos varían con cada modalidad deportiva. En el tenis, por ejemplo, la figura del árbitro no es tan importante y podría darse el caso de que si se generalizara el uso de lo que se conoce como *ojo de halcón*, la presencia de un árbitro no tendría tanta relevancia.

Algo ha cambiado respecto a la inocente visión del deporte que dábamos al principio de este apartado: lo primero que notamos es que se ha roto la linealidad. Lo que vemos en la realidad es un *comportamiento no lineal* y por tanto este será el primer concepto que trataremos. Una relación es no lineal cuando la respuesta no es proporcional al impulso, o la salida no es proporcional a la entrada. Pero esto no es todo: no lineal significa que puede haber más de una respuesta a un mismo estímulo y, aún más, en muchos casos la respuesta no es del todo previsible. En un mundo no lineal, las certezas desaparecen y nos movemos en lo probable. Las reglas ahora no son tan sencillas como antes: *si le digo lo que pienso, probablemente me ; si cambio de entrenador creo que ; si ataco antes de llegar al puerto es probable que logre una ventaja suficiente, pero ; si entreno de forma diferente el tiro a canasta tendré un porcentaje de aciertos más elevado, pero ; en el partido puedo estar cansado, un defensa me estorba, debo lanzar la pelota en movimiento, etc.*

Alguien podría señalar que esta incertidumbre es debida al comportamiento de los demás, a que no estamos solos, a que somos muchos, lo

cual no sólo es cierto sino que es una de las características de los sistemas complejos. Así, los sistemas complejos son sistemas que constan de muchos elementos, a los que llamaremos también agentes, y las relaciones que se establecen entre ellos son principalmente no lineales. Un sistema es cualquier región del espacio o el tiempo, aislada del resto o no, con fronteras bien definidas físicamente o imaginarias, que nosotros elegimos por algún tipo de criterio o interés. Por tanto, dentro de la definición de sistema complejo dada entran una infinidad de sistemas: una célula, una persona, un hormiguero, una empresa, un país, un sistema ecológico, un club de amigos, la atmósfera y el clima, un océano, un líquido en una taza, un río, etc.<sup>7</sup> La única condición es que las relaciones entre sus elementos sean no lineales.

En muchos sistemas, y esto es importante, las interacciones son locales, es decir afectan sólo a la relación entre los agentes y ninguno de ellos es consciente del comportamiento colectivo que resulta de dichas interacciones. Del trabajo de las neuronas o de las hormigas, elementos que mantienen entre sí sólo relaciones locales, emerge el pensamiento o el hormiguero, dos sistemas de gran complejidad y coherencia que carecen de explicación si sólo atendemos a la simplicidad de los elementos que los componen aunque estos, individualmente, puedan considerarse a su vez sistemas complejos. De aquí podemos extraer otra característica de estos sistemas que se resume en: *el todo es más que la suma de las partes*.

### Características principales del comportamiento de los sistemas complejos

Estos sistemas se caracterizan por tener un estado delicadamente equilibrado que está sujeto, a la vez, al estado en el que se encuentra todo lo que le rodea, ante el que muestra una gran sensibilidad<sup>7</sup>. Tal situación les confiere un comportamiento altamente impredecible (caótico, que no aleatorio). Así, ante un dolor de cabeza se receta un medicamento que calme o elimine el dolor, pero la realidad nos enseña que cada sujeto responde a un medicamento y/o a dosis diferentes. Ni siquiera siempre el mismo organismo responde de la misma manera al mismo tratamiento.

Si esto es así, ¿por qué no aplicarlo al estudio de la respuesta adaptativa (aguda o crónica) que tiene lugar en el organismo por efecto de las cargas de entrenamiento? ¿Por qué no utilizarlo en el estudio del deporte? Quizá tengamos que reflexionar y plantearnos, con seriedad, la necesidad de abrir nuestra mente a nuevas formas de abordar el deporte y su entrenamiento.

Tampoco la medicina ha logrado ampliar su tradicional concepción causal mecanicista en la que tradicionalmente se ha movido. A lo sumo, tal y como reconocen Fariñas et al<sup>8</sup>, las ciencias biológicas y particularmente la medicina, han iniciado el camino un modelo multicausal probabilístico/estadístico que apenas cuestiona el modelo actual vigente desde el inicio de estas ciencias.

Pese a la actual oposición, más o menos generalizada, cada vez son más las ramas de la medicina que exploran sus planteamientos científicos desde el campo de la complejidad. Sistemas fisiológicos como la respuesta hormonal<sup>9-11</sup>, las endocrinopatías<sup>12</sup>, la diabetes<sup>13</sup>, la genética<sup>14</sup>, las demencias<sup>15</sup>, y muchos otros campos de la medicina han sido objeto de estudio desde el campo de la complejidad. La mayor parte de ellos buscan en la variabilidad intrínseca que manifiesta el comportamiento de los sistemas complejos, y no en su *teórico* equilibrio, la fuerza de sus investigaciones. En consecuencia, centran sus aportaciones

en su realidad: en el hecho de que estos sistemas operan lejos del equilibrio absoluto.

### Criticalidad

Para explicar este concepto regresemos al tema de la competitividad en el deporte. Como todos sabemos, cuando un equipo (en fútbol, balonmano, baloncesto, etc.) o un jugador (como en tenis) es muy superior a su contrincante, el juego carece de interés. Se pueden producir faltas o juego sucio y peligroso que sólo reflejan la impotencia para detener al rival. Por el contrario, cuando el juego está muy equilibrado es cuando los equipos deben jugar al límite de su capacidad. El tenista debe buscar las líneas, colocar las bolas de forma que el otro encuentre dificultad para devolverlas; los futbolistas han de ajustar los fuera de juego bordeando la falta y esperando que el árbitro no lo vea, aprovechar cualquier pequeño error del otro y tratar de no cometerlos, etc. Este tipo de confrontaciones, en el argot periodístico, son los que crean afición.

Al intentar resolver estas situaciones límite es cuando los deportistas y su entorno se deben emplear a fondo, y cuando pueden aprender. Es en este momento cuando los sistemas deportivos crean nuevas estrategias, planes de entrenamiento y, por tanto, es cuando evolucionan, cambian o se comportan de acuerdo a una nueva realidad. Es decir, la rivalidad, la competitividad son los elementos que generan el *comportamiento crítico*. Es en estos casos cuando la teoría de sistemas complejos toma prestado un concepto procedente de la mecánica estadística, una rama de la física, conocido como *criticalidad o comportamiento crítico*<sup>16-19</sup>.

El concepto tiene que ver con aquellas delicadas situaciones en las que un sistema se sitúa cuando se va producir un cambio de fases (por ejemplo: el paso de un estado líquido al estado sólido). Se ha demostrado que en el estado crítico, en *transiciones de fase de segundo orden*, es cuando en el sistema se dan correlaciones de largo alcance, que afectan al sistema global, aunque las interacciones sigan siendo locales<sup>20</sup>. Es en estas condiciones, por tanto, cuando la información fluye mejor entre todas las partes del sistema. Esto es así en los diferentes aspectos del deporte (competición, entrenamiento, organización, etc.) y en los efectos que los mismos generan en el organismo del deportista (adaptaciones biológicas o de la conducta).

Cowan et al<sup>21</sup>, por ejemplo, demuestran que las mismas herramientas matemáticas que usan los físicos para describir el comportamiento de las partículas subatómicas y la dinámica de fluidos y sólidos, así como los comportamientos que observan en las transiciones de fase, también pueden ser utilizados para comprender cómo el cerebro genera sus distintos ritmos. Sus descubrimientos afectan, entre otros, a las ondas delta generadas durante el sueño, las ondas alfa del cerebro visual, y las ondas gamma que parecen estar relacionadas con el procesado de la información.

La teoría de sistemas complejos no lineales denomina a esta situación *frontera del caos, evolución entre el orden y el caos, sistemas críticos autoorganizados*, y le presta gran atención. Un ejemplo es la *hipótesis de la Reina Roja*, que propone Van Valen<sup>22</sup> en su trabajo sobre la extinción de las especies. Esto es de gran importancia a la hora de analizar y comprender el deporte.

Este tipo de sistemas son abiertos y se mantienen lejos del equilibrio, por lo que necesitan fuentes externas de materia, energía e información para mantenerse. No obstante, no lo hacen de cualquier manera y con respuestas atípicas, lo hacen ajustándose a la demanda y siguiendo patrones específicos.

Pensemos en el corazón. Su ritmo de trabajo responde a estímulos que recibe del sistema vegetativo (ramas simpática y parasimpática) después de que ha codificado infinidad de estímulos de diferentes características (auditivos, mecánicos, químicos, visuales, etc.) que percibe tanto de su entorno como de su medio interno<sup>23</sup>. Pero cuidado, no lo hace de cualquier manera, pese a responder de forma rápida, no pasa de latir a 60 latidos por minuto a hacerlo a 200. Tiene memoria y mecanismo de regulación que va ajustando la respuesta a la demanda.

Al parecer, a medida que estos sistemas evolucionan tratando de optimizar al máximo sus recursos, tienden de manera natural a situarse en estos estados que, por tanto, funcionan como *atractores* del sistema<sup>24</sup>. No nos debe extrañar, por lo señalado, que en la naturaleza los sistemas abióticos como el clima, o los biológicos, dirigidos por la selección natural, se mantengan más cerca de las situaciones críticas que con comportamientos definidos y estables<sup>17</sup>.

### ¿Se comportan de forma aleatoria?

Un suceso es aleatorio cuando el resultado de una acción es totalmente independiente de la causa que lo produce, como tirar una moneda, extraer una carta de un mazo previamente barajado o, como sucede en el billar, golpear un triángulo de bolas con la bola blanca<sup>25</sup>. A pesar de la aleatoriedad subyacente a estos fenómenos, todos sabemos que hay magníficos jugadores de billar; hay quien casi siempre gana. Una vez la bola es golpeada se produce una sucesión de choques y a partir de cierto punto el movimiento de la bola se hace impredecible; salvo para jugadores profesionales, el billar es un juego de azar. Esto es transferible a cualquier modalidad deportiva.

Hay muchos juegos de azar que atrapan a las personas debido al magnetismo que lo aleatorio parece ejercer sobre el ser humano<sup>26</sup>. Sin embargo muchas personas tratan de “controlar” dicho azar y así ganar en este tipo de competiciones. El jugador de póquer no gana por tener mejores cartas, sino porque juega con otros seres humanos; se especializa en trabajar con las emociones de los demás; lee en las caras de los otros el juego que tienen; gestiona el engaño, el farol, etc.

Al igual que en otros deportes, en su esencia, el juego de póquer es simple: se reparten cartas al azar y el que mejor juego tiene es el que gana. Así, *a priori* todos tienen las mismas posibilidades y, aunque actúa el azar, el sistema sigue siendo lineal. Lo que lo hace no lineal y, por tanto, lo que permite a alguien ganar a pesar del azar, son los innumerables *bucles de realimentación* que funcionan en cada persona en forma de emociones.

El mundo financiero al parecer también funciona de esta manera y, hablando de la actual crisis económica mundial, vemos cómo algunos economistas han comentado que el sistema financiero se basa en dos pilares poco científicos pero muy realistas: la codicia y el miedo. Si las cosas funcionan a favor, actúan bucles de realimentación positiva que estimulan la codicia, y se produce un efecto bola de nieve que algunos en teoría de la complejidad denominan *efecto San Mateo*, ventaja acumulativa o *preferential attachment*<sup>27</sup>: el dinero llama al dinero, voy donde van los demás, etc. Si por el contrario aparece el miedo, este también actúa como un bucle de realimentación positivo, aunque en el sentido contrario. Sálvese el que pueda, vendo si todos venden, etc. El miedo es una emoción que funciona como una realimentación negativa, te hace más prudente, más conservador. Pero el miedo exagerado tiende a paralizar, a retraer o evitar. Puede funcionar entonces como una realimentación positiva, es decir un efecto bola de nieve, pero invertido. Todo esto es aplicable al deporte en cualquiera de sus manifestaciones y es algo

que todos los técnicos y deportistas tienen en cuenta para afrontar una confrontación e intentar conseguir la victoria.

Tanto en el deporte como en algunos círculos financieros frecuentemente ganan los que mejor ocultan su juego, los que hacen creer que tienen buena jugada o gestionan muy bien el *miedo* o la *codicia* ajena. Con esta lógica se desarrollan la mayor parte de las confrontaciones deportivas.

Sin embargo, la manera de manifestarse cambia, en forma y magnitud, según la modalidad deportiva. Es cierto que en deportes individuales (atletismo, natación, ciclismo, etc.) las cosas no siempre funcionan así y si alguien es claramente superior al resto lo normal es que gane, salvo que suceda algo extraordinario. Pero lo extraordinario sucede: pregunten al equipo americano de relevos en la última olimpiada (Beijing 2008). Siendo favoritos, los equipos femenino y masculino fueron eliminados en las series de clasificación por caída del testigo en el último relevo. La debilidad del sistema en este caso no reside en la velocidad de los corredores, sino en la interacción entre ellos y en la adversidad. Es decir, el funcionamiento del sistema es la clave y no las características de sus elementos.

### Redes complejas y deporte

Muchos sistemas complejos funcionan como una red en la que los vértices (o nodos) representan los elementos o agentes y las líneas que unen los vértices representan las relaciones entre ellos: quién está relacionado con quién<sup>28</sup>. En el fútbol los nodos son los jugadores y las posibilidades de pase, y las limitaciones del reglamento, configuran las relaciones entre ellos. En el organismo su expresión durante la carrera depende de los numerosos sistemas funcionales que generan el movimiento y de las múltiples y complejas vinculaciones que existen entre ellos.

En los últimos años se ha desarrollado toda una teoría de *redes complejas*, a partir de la antigua teoría matemática de *grafos*<sup>29</sup>. Las conexiones entre los elementos de la red pueden ser al azar por lo que tendríamos redes aleatorias o, por el contrario, la red puede ser determinista y todos sus elementos estar relacionados con todos de una forma geométrica bien definida.

Se ha demostrado también que este tipo de redes son más óptimas que las otras, de manera que se puede ir de un nodo a otro en un mínimo número de pasos. Además, estas redes son muy robustas, siguen funcionando aunque una buena parte de tal red sea eliminada, etc. Esto, por ejemplo, permite a una persona seguir viviendo aunque le falte un brazo o el apéndice, a un deportista seguir corriendo aunque se agoten sus reservas de glucógeno o a un equipo ganar un partido aunque el equipo rival anule a su jugador estrella.

Los seres vivos forman estructuras de este tipo, tanto en su funcionamiento interno (redes metabólicas) como colectivo (redes ecológicas)<sup>17</sup>. También muchas redes sociales, conocidas como *redes de pequeño mundo*, siguen este modelo. Sin embargo, estas redes son muy sensibles a los ataques bien dirigidos. El ataque de la serpiente con su veneno es más eficaz, a la hora de reducir a su presa, que el del león. Así, una carrera puede cambiar de vencedor según la forma de desarrollarse (a ritmo o táctica), o un equipo puede perder un partido por un fallo tonto en la defensa a pesar de tener una ventaja potencial evidente sobre el rival, etc.

Entre las ya mencionadas redes aleatorias y las redes deterministas se sitúan las redes complejas, las cuales se han estructurado siguiendo patrones no lineales y cuya estructura muestra una geometría fractal<sup>30</sup>. Estas estructuras, por ejemplo, son habituales en el organismo; es típico mostrar las vías aéreas como ejemplo de fractalidad. Es también habi-

tual utilizar el sistema arterial pulmonar, la red vascular o la red nerviosa de His-Purkinje, entre otros sistemas orgánicos, como ejemplo de fractalidad.

Su existencia, además de su profundo conocimiento, ha permitido a la medicina desarrollar protocolos y herramientas de diagnóstico sumamente útiles. Su aplicación en las ortopantografías, mamografías, la resonancia magnética nuclear o la histología son algunas de las utilidades más recientes.

Una característica de la fractalidad es que presenta, en su estructura, algunos nodos muy relacionados y otros menos, de manera que la distribución de los enlaces en cada nodo sigue una ley de potencia (PL)<sup>27</sup>. Las PL se manifiestan en numerosos fenómenos, frecuentemente *fractales*, donde una gran cantidad de elementos interaccionan entre sí para producir una estructura a nivel superior. Suele ser difícil encontrar leyes que regulen matemáticamente las cosas en el mundo de la biología, y que puedan aplicarse de la misma forma a todos los seres vivos parece una tarea imposible. A pesar de ello, estas leyes no sólo existen, sino que tienen mucho que decir en áreas tan diversas como el crecimiento, el envejecimiento, las cargas individualizadas de entrenamiento deportivo, la dosificación de sustancias ergogénicas o medicamentos ajustados al peso, la respuesta cardiaca, etc. Tales comportamientos en PL, en el caso de la biología, se denominan *leyes alométricas*<sup>31</sup>.

### Orden y caos

Anteriormente señalamos que golpear una bola con un hierro (como ocurre en el golf) podría, en primera instancia, considerarse un proceso lineal. Esto sólo es así si la bola es un objeto puntual. En este caso, si el terreno no es liso, si hay viento o choques contra obstáculos, la trayectoria de la bola se hace aleatoria y su comportamiento sigue el conocido *movimiento browniano*<sup>32</sup>. Ahora bien, las pelotas, como cualquier otro móvil, no son objetos puntuales: su comportamiento se aleja de la linealidad pues viene provocado por la realidad del juego: una serie de efectos en los giros y/o en los botes pueden ser aprovechados por los deportistas para conseguir sus fines. Cuando se golpea una pelota o se lanza al aro en baloncesto, cualquier especialista sabe que un mínimo cambio en las condiciones del lanzamiento hace que la pelota no alcance el objetivo deseado. Estos dos elementos: *no linealidad y sensibilidad extrema a las condiciones iniciales*, son dos ingredientes clave en procesos o comportamientos denominados *caóticos*<sup>33</sup>.

La *teoría del caos* surgió hace unos años al tratar de explicar muchos fenómenos que se dan en la naturaleza, como los meteorológicos, y comprobarse cómo un cambio muy pequeño en los datos iniciales hacía el proceso impredecible a largo plazo<sup>34</sup>. Aunque el fenómeno matemáticamente había sido descubierto y estudiado por Poincaré a finales del siglo XIX<sup>35</sup>, pasó desapercibido, ya que las matemáticas eran incapaces de resolver los problemas no lineales con los métodos conocidos. Con la aparición del ordenador, las ecuaciones se podían resolver con una gran precisión y los resultados se podían visualizar de manera gráfica casi inmediatamente.

El resultado más sorprendente que se obtuvo fue que sistemas muy simples y con muy pocas variables, o grados de libertad, relacionadas entre sí de forma no lineal, se tornaban impredecibles a largo plazo y mostraban un comportamiento aparentemente aleatorio. Antes, con una visión lineal del mundo, se creía que este comportamiento casi aleatorio era debido a que los sistemas eran demasiado grandes, con demasiadas variables no accesibles y, por tanto, sólo admitía un tratamiento de tipo estadístico.

A pesar de que los sistemas caóticos no son predecibles a largo plazo, la teoría del caos proporciona la esperanza de que sistemas con comportamiento muy irregular, puedan estar siendo gestionados por muy pocas variables, relacionadas entre sí de forma no lineal. Esta idea es de gran importancia para abordar eficazmente la actividad física y el entrenamiento deportivo. En estas actividades, como en el caso de la meteorología, aunque no seamos capaces de predecir el tiempo más allá de una semana, sí sabemos que el sistema globalmente permanece estable. Es decir, se sucederán borrascas y anticiclones, lluvias, tormentas y buen tiempo de manera que, con pequeñas variantes, los climas locales seguirán siendo los mismos.

Ahora bien, que las variables que caracterizan un sistema se relacionen entre sí de forma no lineal *no quiere decir que el comportamiento del sistema necesariamente tenga que ser caótico*. Sistemas complejos no lineales, como los seres vivos, son extremadamente ordenados, lo cual es necesario para que se realicen la infinidad de procesos metabólicos que los determinan. Hasta el punto de que se ha asociado comportamiento caótico con enfermedad. Sin embargo, en estos sistemas conviven orden y caos y, así se ha demostrado que, por ejemplo, el sistema cardiaco de un organismo sano presenta un comportamiento caótico<sup>36-38</sup>.

En un sistema no lineal el caos sólo aparece, en general, para un cierto rango de los valores de los parámetros que rigen dicho sistema<sup>33</sup>. Así, un sistema no lineal capaz de actuar sobre los parámetros que lo rigen y, por tanto, gestionarlos de alguna manera, puede controlar los comportamientos caóticos. Un experto gimnasta, a base de entrenamiento, consigue un control magistral de las intensidades y ritmos de trabajo en la ejecución de sus ejercicios. Un buen jugador de baloncesto encesta con magnífica precisión, desde posiciones de tiro diferentes, a pesar de la gran sensibilidad a las condiciones iniciales. Un tenista coloca las bolas casi donde quiere mientras que un buen futbolista da un pase sensacional a un compañero a muchos metros de distancia. Este magnífico control del caos engaña, hace que el comportamiento parezca lineal, que la respuesta sea casi proporcional a la acción, que el movimiento, la coordinación o el gesto de un deportista de elite parezca casi perfecto y que se realiza sin esfuerzo aparente. Pero cuidado, simplemente parece sencillo y perfecto. La realidad es otra.

En el deporte, el problema es que aunque yo sea muy bueno, mi contrincante, por desgracia, también lo es, y tratará, por todos los medios, de conseguir que falle. Además, como los sistemas son complejos, aunque este año yo sea el mejor con diferencia sobre los demás, en la próxima temporada soy el enemigo a batir, todos se entrenan contra mí, sus sistemas se remodelan, los entrenamientos se copian, los jugadores se compran y venden y yo soy un año más viejo, en otras palabras: *los sistemas se adaptan*.

A medida que un deportista entrena su organismo, en respuesta a la carga, se *autoorganiza* cada vez mejor, afinando todos y cada uno de los mecanismos que intervienen en la mejora de la forma, mejorando la comunicación entre todos los subsistemas que componen su organismo<sup>17</sup>. De este proceso emerge un determinado estado de forma física pero, si este es su mejor estado posible o no, es otra cuestión. Y aquí tenemos otra definición: *los sistemas deportivos son sistemas complejos adaptativos, sistemas capaces, tanto de evolucionar adaptándose al medio, como de transformar el medio en su beneficio*<sup>5,6</sup>.

### Organización, emergencia y realimentación

Las colonias de hormigas o el cerebro son estructuras emergentes, es decir, creadas por un gran número de individuos que intercambian informa-

ción localmente, de manera que ninguno de ellos tiene conciencia del superorganismo que están ayudando a construir. Tampoco el riñón entiende de carreras de fondo, pero cuando por efecto de la hipoxia produce eritropoyetina, aumenta la producción de glóbulos rojos, estos aumentan el transporte de oxígeno a los tejidos y, como consecuencia, el sujeto mejora el rendimiento en este tipo de disciplinas. En los sistemas biológicos las reglas que gobiernan la interacción entre los componentes han evolucionado a través de la selección natural, proceso que ha generado una enorme diversidad de comportamientos e interacciones fisiológicas.

La formación de un determinado patrón o arreglo en un sistema que recibe instrucciones desde fuera, o que sigue un plan o una receta con detalle, es fácil de entender. Pensemos en una banda desfilando o unos operarios construyendo un edificio. Estos patrones suelen responder a formas geométricas u ordenaciones temporales más o menos sencillas. Ahora bien, los patrones obtenidos mediante la autoorganización, sin órdenes externas, son más difíciles de identificar: muestran estructuras geométricas o temporales en apariencia de estudios irregulares (*fractales*)<sup>30</sup>. Esto nos obliga al uso de herramientas de estudios diferentes a las tradicionalmente utilizadas. Por eso, cuando tratamos de conocer la estructura fractal en la variabilidad de la frecuencia cardiaca no nos sirve la estadística tradicional sino que utilizamos técnicas no lineales como, por ejemplo, la dimensión de correlación.

En un proceso autoorganizado, los agentes trabajan mediante algún tipo de entendimiento mutuo, sin órdenes externas, y los patrones que se observan en los niveles de organización más altos (cerebro, pensamiento, etc.) emergen sólo de las numerosas interacciones, no lineales, entre los individuos o subsistemas que componen los niveles inferiores (neuronas)<sup>39</sup>.

El tipo de fenómenos emergentes que pueden surgir no son predecibles con anterioridad y no podemos saber de antemano si afectarán al sistema de una forma positiva o negativa<sup>16</sup>. También es claro que estos fenómenos no pueden ser entendidos examinando aisladamente las propiedades individuales de los componentes del sistema, algo común en el entrenamiento o en la fisiología del ejercicio; se han de considerar las interacciones entre sus componentes y tener en cuenta que las interacciones pueden no ser directas, ya que un individuo puede modificar el ambiente y este a su vez afectar el comportamiento de los demás.

Por ejemplo, podemos encontrar en el deporte situaciones en las que cada individuo basa su comportamiento más en su percepción de la posición y velocidad de los rivales o compañeros, que en el comportamiento del equipo entendido como un todo. De ocurrir, estamos ante un grave problema salvo que el jugador sea tremendamente desequilibrante (por ejemplo un jugador profesional en una liga de aficionados).

También se dan casos en los que un individuo puede basar su actividad en el seguimiento de los rastros o señales locales dejados por otros, en su interpretación de los acontecimientos o, simplemente, en imitar pautas (ejemplo: parece que los rivales están cansados; parece que determinada banda presenta errores de comportamiento, etc.). Debemos ser prudentes, sin embargo, en la interpretación de estos signos ya que pueden haber sido provocados conscientemente por el rival para engañarnos y hacernos caer en su juego.

Más aún, a diferencia de las neuronas o las hormigas, los deportistas son capaces de adquirir información tanto de las propiedades locales como del sistema total, aunque dicha información puede ser interpretada de forma incorrecta. Tal planteamiento potencia la figura de otros actores del sistema (por ejemplo: entrenadores) que crearían canales de información que condicionarían la acción del deportista o el desarrollo de una modalidad.

En un sistema autoorganizado es clave el trabajo de los *bucles de realimentación*<sup>40</sup>. Así, bucles de realimentación positiva bien acoplados con negativos funcionan como un poderoso mecanismo para crear estructuras y patrones en muchos sistemas físicos, biológicos, económicos, etc. La realimentación negativa son reacciones que tienden a estabilizar los sistemas, tratando de contrarrestar las fluctuaciones del ambiente. En los organismos animales es la base de la *homeostasis*, de la restauración de los equilibrios: pH muscular, frecuencia cardiaca, etc. Para ello se dispone de una serie de sensores adecuados (mecanorreceptores, barorreceptores, etc.).

En los seres humanos, además de estos sensores biológicos, actúan sensores de otra naturaleza, como pueden ser los de tipo cognitivo, psicológico y/o de percepción<sup>23</sup>. Por ejemplo, los asociados al miedo, al exceso de celo, a la conservación, a la repetición de patrones conocidos, a la prudencia, etc. Todos ellos generan actitudes defensivas o conservadoras. En general la adquisición y el procesamiento de información tienden a fomentar los fenómenos de retroalimentación negativa. En nuestro esquema digamos, con cierta prudencia, que están asociados al orden.

La retroalimentación positiva, por el contrario, dispara el sistema, promueve cambios, es la responsable de los crecimiento explosivos (ejemplo: cambios adaptativos del organismo), de los efectos tipo bola de nieve. Así un cambio o perturbación inicial se refuerza mediante estos bucles y se amplifica, manteniendo la dirección de la desviación inicial. Conceptos como automejora, amplificación, facilitación o autocatálisis son términos asociados a estos fenómenos.

Un resultado que funciona para unos es imitado por los demás; el *comportamiento imitativo* es un caso típico de *feedback* positivo. Este es un comportamiento muy conocido por aquellos que analizan las características de los líderes sociales o políticos. Cuando en los años setenta algunos extranjeros hacían surf en las playas del norte de España los jóvenes locales miraban con asombro y sorpresa sus evoluciones, hoy todas las playas del país que lo permiten están plagadas de numerosos practicantes locales y muchos de ellos logran patrocinadores para competir en los circuitos internacionales. Así, cuando algo crece, funciona como un estímulo y se puede producir un efecto de realimentación positiva. En la teoría de los sistemas dinámicos no lineales, desde su origen<sup>41</sup> se denominó a este fenómeno *amplificación de fluctuaciones*, manteniendo que son los mecanismos de amplificación de fluctuaciones aleatorias los que finalmente crean nuevos órdenes.

Ahora bien, el mantenimiento de los bucles de realimentación positivo bajo control, es el trabajo de la realimentación negativa, de manera que el sistema llega a ser estabilizado. Lo interesante en los sistemas complejos es que el nuevo estado del sistema es diferente al de partida, lo que implica que se ha producido algún tipo de aprendizaje<sup>6</sup>. Y al aumentar la información en el sistema, en teoría, deben mejorar los efectos de inhibición de la realimentación positiva.

Un ejemplo claro lo encontramos en el sistema inmunológico. Cuando el organismo es atacado por un virus, reacciona el sistema inmunológico con rapidez tratando de combatirlo; una vez lo logra puede llegar a ser inmune a nuevos ataques o simplemente ha aprendido a contrarrestar futuros agresiones<sup>42</sup>. Algo parecido acontece sistemáticamente en el deporte.

La retroalimentación negativa funciona, por tanto, inhibiendo la amplificación, los efectos tipo bola de nieve, aunque no es la única. A veces el crecimiento indiscriminado cae por su propio peso. Un castillo de arena, cada vez más alto, al final de desmorona por gravedad. Pensemos en la crisis que padecemos.

Ahora bien, la mera detección de patrones, o pautas bien definidas, no nos capacita para detectar claramente el mecanismo. Es decir, no nos capacita para distinguir si son debidos a mecanismos autoorganizantes subyacentes o son efecto de la actuación de otros mecanismos de formación de patrones<sup>40</sup>. Además, estos sistemas si bien evolucionan y tienen gran capacidad de respuesta adaptativa a cambios en su entorno, dependen de manera muy sensible a cambios en cualquiera de los parámetros que los caracterizan. Así un cambio pequeño en los individuos que lo conforman puede inducir grandes cambios en el comportamiento colectivo, impredecibles debido a la gran variedad de rangos de respuestas posibles (no linealidad) y a la facilidad de pasar de unos comportamientos a otros.

Los bucles de retroalimentación positivos pueden amplificar condiciones iniciales aleatorias o cualquier perturbación desde el ambiente, y de esta forma el sistema puede evolucionar hacia una de las múltiples e impredecibles respuestas posibles<sup>43</sup>. Si nos fijamos en la biología evolutiva, vemos con asombro la abundante variabilidad genética que nos demuestra que en cualquier especie existen diferentes versiones, o alelos, de la mayoría de los genes.

Sin embargo, los sistemas autoorganizados no son ni frágiles, ni erráticos; por el contrario, son extremadamente robustos y estables, como demuestran los sistemas sociales, ecológicos, etc. En general, los sistemas autoorganizados en su mayoría se sitúan lejos de los puntos de bifurcación, y muestran resistencias a pasar de un patrón a otro; operan de forma muy estable dentro de un único régimen y con capacidad de autorreparación; los patrones característicos actúan como *atractores del sistema*<sup>43</sup>. La selección natural genera nuevas estructuras adaptativas por un ajuste muy fino y lento de parámetros muy simples, en lugar de desarrollar nuevos mecanismos para cada nueva estructura.

Llegados a este punto, debemos recordar que existen otros mecanismos para la formación de patrones. El orden dentro del sistema puede surgir por fuerzas externas impuestas<sup>44</sup>. Desde un punto de vista humano podemos identificar estructuras bien ordenadas sin interacción de tipo autoorganizante entre sus componentes<sup>8</sup>. Así, un líder o uno de los propios agentes mejor informado que los demás, puede dirigir la actividad dando a cada miembro las instrucciones precisas. Por ejemplo, unos remeros pueden recibir órdenes concretas por parte del timonel. El liderazgo funciona bien si la relación entre los componentes del sistema entre sí y con su entorno es de carácter lineal: la respuesta es siempre proporcional al estímulo. Así, como en el caso de ciertas estructuras militares o empresariales, se entrena a los individuos para que respondan todos y sin vacilar a determinadas órdenes.

En el caso de los sistemas humanos, y dada la peculiaridad de cada persona, esto siempre es difícil de conseguir; además puede que no sea lo ideal<sup>5</sup>. En general, el comportamiento del grupo no tiene necesariamente que seguir las instrucciones al pie de la letra; por otra parte, continuamente se recibe información o estímulos desde el exterior, no tenidos en cuenta, a los que se ha de responder. O incluso, como en el caso de los remeros o en un deporte de equipo, se ha de tener en cuenta el comportamiento local de los compañeros, la aparición de oportunidades, la interpretación de sucesos, los efectos psicológicos, etc. En estos casos, y a pesar de la presencia del líder, la autoorganización puede jugar un papel importante, aunque en ocasiones pueda tener un carácter negativo. En los sistemas humanos el papel que juega la no linealidad de la interacción entre los sujetos es muy difícil de controlar, y puede no ser lo correcto.

Otro aspecto es realizar el trabajo siguiendo un plan determinado, un programa que unifique, tanto en el tiempo como en el espacio, el comportamiento de las diferentes partes<sup>3</sup>. El mejor ejemplo quizá sea el pa-

pel de la partitura en una orquesta o los planos para la construcción de un edificio. Sin embargo, tanto los músicos como los operarios pueden no haber recibido toda la información contenida en el plan general y, por tanto, no está asegurada la sincronización adecuada para conseguir un buen resultado, por muy cualificado que esté cada elemento. En ocasiones, el plan dice lo que hay que hacer, pero no cómo hacerlo. Otra forma de actuar es mediante la receta: una receta da instrucciones con precisión sobre las acciones temporales o espaciales requeridas, así como la contribución de cada individuo. Esta, sin embargo, tiene el defecto de carecer de *flexibilidad* y en los sistemas deportivos es importante la capacidad de innovación y la libertad del agente para encontrar la respuesta a cada situación.

Así, en un equipo de fútbol, por ejemplo, cada jugador debe ejecutar ciertas instrucciones (según la posición en el campo o el papel de juego asignado), aunque el resultado va a depender de su impronta personal y de la interpretación que haga o asuma de las instrucciones que emanan del líder (otro jugador o entrenador). Por otra parte, la realidad es terca al demostrar que el comportamiento debe poder ser modificado constantemente debido a imprevistos que surgen durante el desarrollo del juego.

Hoy se trabaja en aspectos como el *control descentralizado*, en el que se permite que la información fluya dentro del sistema y cada individuo o subsistema reúne información y decide por sí mismo<sup>45</sup>. En todo caso la naturaleza, o mejor, la selección natural, parece favorecer los mecanismos de autoorganización que dotan a los comportamientos y mecanismos fisiológicos de una mejor economía tanto de recursos como energética<sup>8</sup>. Sin embargo, en la naturaleza, en el mundo animal, también aparecen líderes, planes, etc., y aunque juegan un papel, obedecen a mecanismos complicados y costosos.

### Escalas y deporte desde la óptica de los sistemas complejos

En el estudio de los sistemas naturales una de las verdades inevitables es que no hay una escala determinada cuya dinámica estudiar, y uno de los objetivos de la ciencia es el estudio de propiedades universales que no dependen de las escalas determinadas por los detalles del modelo. El inevitable problema de la escala viene asociado también al hecho de que tanto los animales como las organizaciones sociales no pueden hacerse mucho más grandes o mucho más pequeños sin experimentar cambios fundamentales en su estructura o conducta. Piénsese, por ejemplo, en las diferencias entre organizar una competición deportiva local o internacional; entrenar a sedentarios o a grandes deportistas que compiten al más alto nivel, etc. Algo similar ocurre con el rendimiento deportivo y las características morfológicas y funcionales de los practicantes<sup>46,47</sup>.

La ley o el comportamiento a escala que siguen muchos fenómenos naturales, se describen por PL<sup>48</sup>. Las PL se manifiestan en numerosos fenómenos, frecuentemente fractales, en los que una gran cantidad de elementos interaccionan para producir una estructura a nivel superior. Estos sistemas evolucionan lejos del equilibrio y, con frecuencia, son altamente disipativos.

Una PL o de escala se describe mediante una expresión matemática del tipo:

$$Y = c X^b$$

Donde  $X$  e  $Y$  son dos variables, cantidades u observables,  $c$  es una constante (también puede entenderse como una constante de normalización), y  $b$  el exponente de escala.

Una expresión de este tipo tiene dos propiedades claves. Si tomamos el logaritmo nos queda,

$$\log(Y) = \log(c) + b \log(X)$$

que es la ecuación de una recta de pendiente  $b$ . Es decir, si en lugar de representar los valores de  $X$  contra los de  $Y$  en un gráfico, representamos sus logaritmos,  $\log(X)$  contra  $\log(Y)$ , lo que vemos es una línea recta. Por lo tanto tenemos una forma rápida de rastrear si una serie de datos sigue una PL: representamos sus logaritmos y estimamos hasta qué punto el resultado se puede considerar o ajustar por una línea recta. Otra ventaja es la cantidad de resultados estadísticos (por ejemplo: análisis de regresión) que se han desarrollado para ajustar y modelizar comportamientos lineales. Por otra parte esta ecuación no varía si cambiamos las escalas con las que observamos las variables. A esta propiedad se la conoce como *invarianza en escala (scaling invariance)* y, los fenómenos asociados a este tipo de comportamiento, se denominan *libres de escala (scale free)*<sup>49,50</sup>. Estadísticamente, una serie de datos que se distribuyan de esta manera, o que se expresen siguiendo una ley de este tipo, no tienen *longitudes (magnitudes) características*, es decir no tienen valores medios o varianzas definidos.

Las PL sugieren la existencia de algún tipo de orden subyacente en sistemas capaces de autoorganizarse<sup>48</sup>, aunque estos mecanismos no han sido completamente explicados en muchos sistemas como los sociales o los deportivos. A pesar de ello hay cierto número de modelos o de procesos que las generan. Uno de los más conocidos es la *criticalidad autoorganizada (self-organized criticality o SOC)*, un modelo popularizado por el físico Per Bak y sus colaboradores Chao Tang y Kurt Wiesenfeld<sup>51</sup>.

Es habitual que nos hagamos la pregunta ¿qué es lo que subyace debajo de la eficiencia funcional de los sistemas? Lo que parece suceder es que los grandes sistemas que funcionan eficazmente no se rigen por el caos determinista, ni por el orden estructural perfecto, sino que se sitúan en una zona crítica, en algún lugar entre el orden y el caos<sup>17,43</sup>. Los fenómenos críticos ocurren generalmente en sistemas que se encuentran lejos del equilibrio, en los que dominan los procesos irreversibles, y en los que, por tanto, la historia o el camino recorrido es importante. De esta manera, cuando un deportista alcanza su forma ideal, considerando ésta como un estado crítico, el camino que ha tenido que seguir es determinante.

Los fenómenos en un estado crítico no poseen una escala característica o típica, ni en el espacio ni el tiempo. De aquí, la presencia de PL que revelan cierto orden y simplicidad detrás de la complejidad. También significa que ninguna diferencia cualitativa existe entre pequeñas y grandes fluctuaciones: eventos raros no necesitan tener causa específica y pueden aparecer en cualquier momento. Lo que en una ocasión tuvo efectos sin importancia, en otra puede iniciar procesos devastadores: ningún análisis de las condiciones iniciales será suficiente para predecir el suceso. En la actualidad, el concepto de *criticalidad*<sup>50</sup> ha pasado a figurar en disciplinas como la geofísica, la biología, la economía, la historia, la sociología o la antropología y, por supuesto, debería tener sentido en todas las manifestaciones deportivas, tal y como trataremos de demostrar en adelante.

Bak<sup>16</sup> sugiere el siguiente modelo o *metáfora* para ayudar a entender este fenómeno: se dejan caer granos de arena, de uno en uno, o poco a poco, que se apilan sobre una mesa. La arena al principio cubre la superficie de manera más o menos plana, y los granos permanecen cerca de donde cayeron. La arena se va apilando en forma de montaña, con una pendiente cada vez mayor, hasta que la adición de nuevos granos empieza a producir deslizamientos. Con el tiempo, se producirán desliza-

mientos o avalanchas de muchos tamaños, algunos de los cuales pueden ser tan grandes casi como la propia pila. El sistema parece mantener una pendiente constante, y se va liberando de los excesos de arena mediante avalanchas esporádicas, de tamaño impredecible. Los granos de arena sufren dos fuerzas, la de gravedad, que los haría caer, y el rozamiento entre ellos, que trata de mantenerlos unidos. En este caso el sistema se encuentra en un estado crítico, manteniendo constantes las pendientes de las laderas, mientras que el tamaño de las avalanchas sigue una ley de potencia. Si la pendiente es demasiado pequeña, los granos simplemente caen y estamos en una situación digamos ordenada o predecible; si la pendiente es muy grande, los granos se sujetan mal y caen de manera aleatoria. Así, el estado crítico es una situación entre el orden y el caos, una transición de fase continua entre dos estados o situaciones distintas. Este modelo o *metáfora* se ha mostrado útil para pensar acerca de muchos otros sistemas, como los ecológicos, sociales o económicos.

Ahora bien, tendríamos que plantearnos la siguiente pregunta ¿es válido en el deporte? En cada competición deportiva se producen resultados de todo tipo: la mayoría bastante normales dentro de los requerimientos de las pruebas, sólo de vez en cuando se producen resultados muy buenos y, muy rara vez, se consiguen registros extraordinarios<sup>56</sup>. No obstante, cuando esto sucede el mundo deportivo se convulsiona.

La cuestión es saber si estos eventos son predecibles a medio plazo. Es lógico que si soy Glen Mills (entrenador de Usain Bolt) sepa, casi con total seguridad, que mi corredor está en condiciones de superar las marcas mundiales de velocidad como lo hizo en los últimos Juegos Olímpicos de Beijing-2008, pero ¿lo sabría con esa certeza un aficionado del otro lado del mundo? Incluso, ¿lo sabrían otros entrenadores? Además, ¿cada cuánto tiempo surge un Bolt?

Curiosamente, al parecer, la respuesta a esta pregunta es la misma que si quiero predecir un terremoto, un alud o una crisis financiera. Todos ellos son procesos en avalancha, en los que durante mucho tiempo se van produciendo todo tipo de eventos, la mayoría de pequeña magnitud, muchos de magnitud mayor y algunos importantes<sup>16</sup>. La realidad es que cuando menos lo esperamos se puede producir la gran catástrofe o el gran acontecimiento. Este tipo de eventos se distribuyen de forma decreciente y así, los más débiles son más abundantes y los más importantes son mucho menos numerosos.

Así también se distribuye la riqueza, muchos ganan algo y muy pocos ganan muchísimo, las ciudades; las guerras; los terremotos; los atascos de tráfico; etc.<sup>16</sup>, son ejemplos característicos. En matemáticas hay infinitas funciones decrecientes que pueden dar cuenta de estos fenómenos, pero lo verdaderamente sorprendente es que todos estos fenómenos, y muchos más, eligen seguir distribuciones cuya forma matemática es la PL<sup>46,48</sup>. Además esta es la única función matemática con la propiedad de ser invariantes a escala y transformarse en una línea recta al tomar logaritmos en las dos variables. Más aún, esto no parece ser por casualidad.

A veces nos sorprende ver cómo hay personas con edad muy elevada (Joan Ruidavets murió a los 123 años de edad), jugadores de baloncesto muy altos (Manute Mol o Gheorghe Muresan con 2,31 cm de estatura), personas extremadamente fuertes (Fidosienko o Stephanek en *powerlifting*) o veloces (el mencionado Usain Bolt), deportistas con genéticas sorprendentes, que parecen violar las leyes de la *normalidad*. Extraño, pero sucede. La distribución normal no es tan *normal* como se cree. De igual manera que sorprende encontrar entrenadores o jugadores que prácticamente hacen su vida deportiva en un solo club, o deportistas que pueden superar varias veces el récord del mundo de su modalidad. Además, los equipos deportivos son sistemas complejos, con dinámicas

internas a veces difíciles de entender, y sometidos a avatares externos: prensa, socios, resultados deportivos, economía, etc., lo que introduce fuertes correlaciones entre sus elementos y esto también afecta a la independencia de los fenómenos aleatorios, lo que aleja a estos sistemas de los comportamientos gaussianos<sup>5</sup>.

### Conclusiones y recomendaciones

A medida que se avanzaba en el entendimiento de los sistemas no lineales, han surgido algunas cuestiones que no se habían tenido en cuenta hasta ahora: los sistemas complejos no lineales pueden tener comportamiento caótico o mostrar fenómenos emergentes. Pueden también presentarse fenómenos en cascada, de carácter súbito, sorpresivo o catastrófico, que no son predecibles a largo plazo, y a medio plazo con mucha dificultad. Esto nos obliga a reconocer que lo verdaderamente determinante en ciencia sigue siendo la explicación, no la predicción.

Este planteamiento pone en entredicho el punto de vista reduccionista que actualmente predomina en la ciencia. Por reduccionismo se suele entender la doctrina de conocimiento de acuerdo a la cual cualquier fenómeno complejo puede ser explicado en términos de algo más simple, estudiando cada componente, y ensamblando de nuevo todo el puzzle con la esperanza de obtener un entendimiento completo de las reglas con las que opera el fenómeno total. Esta forma de reduccionismo es el principio predominante en la investigación científica actual, y viene avalada por los grandes éxitos científico-técnicos actuales. Sin embargo, los resultados obtenidos por las ciencias del caos, los fractales o de la complejidad apuntan que hay una gran variedad de modelos sencillos que exhiben comportamiento complejo; sistemas dinámicos sencillos que muestran comportamiento caótico. También hay comportamientos complejos que pueden ser descritos con ingredientes muy sencillos, aunque no lineales y, por tanto, el uso de modelos complicados necesariamente no explica mejor la realidad.

Parece plausible que el deporte, y sus ciencias afines, se puedan analizar, de forma complementaria y nunca excluyente, desde la mencionada perspectiva. Ciertamente, esta es una forma globalista, reflexiva, dinámica y participativa de afrontar el deporte y las estructuras deportivas. Frente a la investigación experimental, que caracteriza el paradigma biofísico, el modelo propuesto trata de estudiar los fenómenos relacionados con el deporte dentro del propio contexto donde se producen, respetando los aspectos ambientales, la espontaneidad, el reglamento, etc., que siempre son aspectos que marcan la identidad de la disciplina deportiva. El modelo se apoya en una concepción más real de los fenómenos deportivos, en el entendimiento de que los sistemas de la naturaleza y, por lo tanto, del ser humano y su comportamiento, lejos de estar en equilibrio, evolucionan de forma constante interactuando entre sí, persiguiendo determinados objetivos.

### Bibliografía

- García-Manso JM. Hacia un nuevo enfoque teórico del entrenamiento deportivo. *INFOCOES*. 1997;2(2):3-14.
- Weaver W. *Science and Complexity*. American Scientist. 1948;36:536.
- Holland, JH. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. New York: Addison-Wesley Publishing Co; 1995.
- Hasselblatt B, Katok A. *A First Course in Dynamics: With a Panorama of Recent Developments*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003.
- García-Manso JM, Martín-González JM. *La teoría del entrenamiento deportivo desde la óptica de los sistemas complejos*. Ingenio (Gran Canaria): Editorial Dauté; 2005.

- García-Manso JM, Martín-González JM. *La formación del deportista en sistema deportivo*. Armenia, Colombia: Kinesis; 2008.
- Jost J. *Dynamical Systems: Examples Of Complex Behaviour* (Universitext). Berlin: Springer-Verlag; 2005.
- Fariñas F, Lundelin K, Aguirregoicoa E, Varela M. En la salud y en la enfermedad: una perspectiva de la biología y la medicina desde la teoría del caos y la geometría fractal. *Rev Esp Fis*. 2009;23(1):57-65.
- Ilias I, Vgontzas AN, Provata A, Mastorakos G. Complexity and non-linear description of diurnal cortisol and growth hormone (GH) secretory patterns before and after sleep deprivation. *End Reg*. 2002;36:63-72.
- Harms HM, Prank K, Brosa U, Schlinke E, Neubauer O, Brabant G, et al. Classification of dynamical diseases by new mathematical tools: application of multidimensional phase space analyses to the pulsatile secretion of parathyroid hormone. *Eur J Clin Invest*. 1992;22:371-7.
- Liu PY, Iranmanesh A, Keenan DM, Pincus SM, Veldhuis JD. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2007;293:E1409-15.
- Pincus SM. Assessing serial irregularity and its implications for health. *Ann NY Aca Sci*. 2001;954:245-67.
- Ogata H, Tukuyama K, Nagasaka S, Ando A, Kusaka I, Sato N, et al. Long range correlated glucose fluctuations in diabetes. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity*. 2007;1:3-11.
- Havlin S, Buldyrev SV, Goldberger AL, Mantegna RN, Êng CK, et al. Fractals in biology and medicine. *Chaos Solitons Fractals*. 1995;6:171-201.
- Abasolo D, Hornero R, Gómez C, García M, López M. Analysis of EEG background activity in Alzheimer's disease patients with Lempel-Ziv complexity and central tendency measure. *Med Eng Physiol*. 2006;28:315-22.
- Bak P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus; 1996.
- Solé RV, Manrubia SC. *Orden y caos en sistemas complejos*. Barcelona: Ediciones UPC; 2001.
- Kauffman SA. *At Home in the Universe*. Oxford: Oxford University Press; 1995.
- Wolfram S. *A New Kind of Science*. Champaign: Wolfram Media; 2002.
- Pérez-Reche FJ. Experimentos y modelos en sistemas que presentan transiciones de fase de primer orden con dinámica de avalanchas. [Tesis doctoral]. Universidad de Barcelona. Barcelona: 2004.
- Cowan GA, Pines D, Meltzer DE. Complexity: metaphors, models, and reality, proceedings. Addison-Wesley; 1994.
- Van Valen L. A new evolutionary law. *Evolutionary Theory*. 1, 1973. p. 1-30.
- Guyton AC; Hall JE. *Textbook of Medical Physiology*. 11th ed. Philadelphia: Elsevier Saunders; 2006.
- Ivancevic VG, Ivancevic TT. *High-dimensional chaotic and attractor systems: a comprehensive introduction*. Kluwer Academic; 2006.
- Kuehl RO. *Design of experiments: statistical principles of research design and analysis*. Duxbury: Pacific Grove; 2000.
- Chaitin G. *Exploring Randomness*. London: Springer-Verlag; 2001.
- Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*. 1999;286:509-12.
- Réka A, Barabasi AL. *Statistical Mechanics of Complex Networks*. *Rev Mod Physics*. 2002;74(1):47-97.
- Biggs N, Lloyd E, Wilson R. *Graph Theory, 1736-1936*. Oxford: Oxford University Press; 1986.
- Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. New York: WH Freeman; 1982.
- Damuth J. Interspecific allometry of population density in mammals and other animals: the independence of body mass and population energy-use. *Biol J Linn Soc*. 1987;31:193-246.
- Nelson E. *Dynamical Theories of Brownian Motion*. Princeton: Princeton University Press; 1967.
- Fernández M. *Sistemas dinámicos con comportamiento caótico: los primeros cien años: 1881-1991*. *El Basilisco: Revista de Filosofía, Ciencias Humanas, Teoría de la Ciencia y Cultura*. 1993;14:39-46.
- Ott E. *Chaos in Dynamical Systems*. New York: Cambridge University Press; 2002.
- Bell ET. *Men of Mathematics*. Touchstone; 1986.
- Radojicic I, Mandic D, Vulic D. On the presence of deterministic chaos in HRV signals. *Computers in Cardiology*, 2001;465-8.
- Wagner CD, Persson PB. Chaos in the cardiovascular system: an update. *Cardiovasc Res*. 1998;40(2):257-64.
- Khadra LM, Maayah TJ, Dickhaus H. Detecting chaos in HRV signals in human cardiac transplant recipients. *Comp Biom Res*. 1997;30(3):188-99.
- Rubio R, Vázquez FJ, Muñoz FF. *Los procesos de autoorganización*. Madrid: Unión Editorial; 2004.
- Pichín MJ, Fariñas AO, Miyares SM. Los sistemas vivos y las ciencias de las complejidades. *Relación entre soma y red biológica*. *MEDISAN*. 2004;8(3):39-45.
- Prigogine I. *Nonequilibrium Statistical Mechanics*. New York: JWiley | Sons (Interscience Division); 1962.
- Goldsbey RA, Kindt TK, Osborne BA, Kuby J. *Immunology*. 5th ed. New York: WH Freeman and Company; 2003.
- Lorenz E. *Designing Chaotic Models*. *J Atm Sci*. 2005;62(5):1574-87.

44. Khalil HK. Nonlinear Systems. 3rd ed. New York: Prentice Hall; 2001.
45. Conley A. Control descentralizado y medidas de interacción. [Master's thesis]. Department of Electrical Engineering. Universidad Técnica Federico Santa María. 2001.
46. García-Manso JM, Martín JM. Leis de Potência ou escala: sua aplicação ao fenômeno esportivo. *Fit & Performance J.* 2008;7(3):195-208.
47. García-Manso JM, Martín-González JM, Da Silva-Grigoletto ME. Sistemas complejos y deporte: aplicación al powerlifting en Ciencias do Esporte. Curitiba, Brasil: Editora Positivo; 2008.
48. Miramontes O. Los sistemas complejos como instrumentos de conocimiento y transformación del mundo. En: Santiago Ramírez Castañeda, editor. *Perspectivas en la Teoría de Sistemas*. México: CIICH, UNAM-Siglo XXI; 2008.
49. Mandelbrot BB. Fractal geometry: what is it, and what does it do? En: Fleishmann M, Tildesley DJ, Ball RC, editors. *Fractals in the natural sciences*. Princeton: Princeton University Press; 1990.
50. Gisiger T. Scale invariante in biology: coincidence or footprint of a universal mechanism? *Biol Rev.* 2001;76:161-209.
51. Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of  $1/f$  noise. *Physical Review Letters.* 2001;59:381-4.