



REVISIÓN

EL BALONCESTO DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS NO-LINEALES

Yves DE SAA GUERRA^a
 Juan Manuel MANRÍN-GONZÁLEZ^b
 Juan Manuel GARCÍA MANSO^a

Laboratorio de Análisis y Planificación del Entrenamiento Deportivo. Departamento de Educación Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España^a
Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España^b

RESUMEN

Objetivos. Describir los fundamentos teóricos en los que se sustenta el estudio de los sistemas complejos y su aplicación al análisis de los deportes de equipo a través del baloncesto. **Método.** Se estudia el baloncesto desde tres niveles diferentes: la competición, el partido y el equipo. En el primer caso se buscó una herramienta que permitiese evaluar el grado de competitividad en base a la incertidumbre que existe en cada confrontación usando la entropía de Shannon. En el segundo se estudió 6150 partidos de la fase regular de la NBA, analizando las canastas y los tiempos de anotación. Por último se hizo una aproximación sobre el funcionamiento de los equipos tratándolos como redes de jugadores y sus interacciones: pases, bloqueos y creaciones de espacio. **Resultados.** NBA y ACB muestra elevados niveles de incertidumbre. La diferencia de puntos actúa como un parámetro de orden. El alto grado de aleatoriedad que existe en la mayor parte de los partidos, diferencia <11 puntos, aportan un elevado nivel incertidumbre al resultado final. Parámetros como pases, bloqueos y creaciones de espacio, pueden ser interpretados como interacciones entre jugadores y permite ser analizadas como redes complejas. **Conclusión.** Las ligas de baloncesto pueden ser interpretadas como sistemas auto-organizado en estado crítico porque se mantiene entre dos situaciones, una de máxima aleatoriedad y otra completamente ordenada. A su vez, los equipos (red de jugadores) tratan de superar el enfrentamiento mediante la auto-organización en base a diferentes modelos de redes complejas.

PALABRAS CLAVE: Baloncesto, complejidad, autoorganización, incertidumbre, red-compleja.

BASKETBALL FROM THE PERSPECTIVE OF NON-LINEAR COMPLEX SYSTEMS

ABSTRACT

Aim. Describing the theoretical framework in which the study of complex systems is based, and its application to team sport through basketball. **Method.** We studied basketball from three different levels: the competition, the game and the team. In the first case we evaluated the uncertainty degree using the Shannon entropy, in order to figure out the uncertainty present in basketball. In the second case we studied 6150 games of the

NBA regular season, analyzing scoring and time between points. Finally we carried out an approach to the team performance using network theory and their interactions: passes, screens and space creations. **Results.** NBA and ACB show high levels of uncertainty. The point difference acts as an order parameter. The high randomness degree that exists in the most part of games, score difference lower than 11 points, points out a high level of uncertainty to the final result. Some parameters such as passes, screens and space creations can be interpreted as interactions among players and enables to analyze using network theory. **Conclusions.** Basketball leagues can be understood as systems organized critically because they remain between two situations, one of maximum randomness and other completed ordered. In turn, teams (players network) try to overcome the game through self-organization, based in different patterns of complex networks.

KEYWORDS: Basketball, complexity, self-organization, uncertainty, complex network.

Correspondencia: Yves De Saa Guerra. Email: yvesdesaa@gmail.com

Historia del artículo: Recibido el 26 de marzo de 2014. Aceptado el 11 de abril de 2014

Aunque el deporte pueda parecer algo simple, meter la pelota en un aro, correr más rápido que un adversario, levantar más peso que mi contrincante, la efectividad rara vez muestra un comportamiento lineal. En realidad, para cada situación hay muchas acciones que pueden considerarse adecuadas. En baloncesto el rendimiento no depende de un solo factor, sino a un compendio de numerosos elementos que influyen los unos sobre los otros. El sistema deportivo, la interacción de los jugadores, el balón, los árbitros y otros muchos aspectos determinan el resultado final. El rendimiento deportivo, entonces, es el resultado de la combinación de numerosas variables. Algunas veces conocidas y otras no, haciendo necesario ser analizados desde la óptica de la complejidad.

Un sistema complejo (*SC*) resulta de la conjunción de varios elementos relacionados entre sí y cuyas conexiones contienen información oculta al observador. Estas relaciones son de carácter no lineal y suelen ser además de tipo local (Goodwin, 2002; Vicsek, 2002; Amaral y Ottino, 2004; Solé, 2009). Estos procesos que tienen lugar simultáneamente a diferentes escalas son especialmente importantes ya que sus unidades se relacionan e influyen sustancialmente en la respuesta de todo el sistema. Algunos autores apuntan que las leyes que describen el comportamiento de un *SC* son cualitativamente diferentes de aquellas que gobiernan sus unidades (Amaral y Ottino, 2004; Vicsek, 2002). Como resultado emergen nuevas propiedades que no pueden ser entendidas desde las características individuales de cada elemento (*propiedades emergentes*).

No-Linealidad. Cuando un sistema es lineal el mismo estímulo siempre produce la misma respuesta. Si el sistema es no-lineal un estímulo puede conducir a varios resultados que no pueden ser conocidos de antemano aunque las condiciones sean las mismas (Prigogine y Holte, 1993; Solé y Goodwin, 2002; Amaral y Ottino, 2004). Las interrelaciones de los componentes de un *SC* son gobernadas por ecuaciones de tipo no-lineal.

Autoorganización. La idea de la autoorganización puede ser expresada como la tendencia general de un sistema dado a generar patrones de comportamiento a partir de las interacciones locales de sus elementos constitutivos y de las relaciones con el medio ambiente. Es la parte esencial de cualquier sistema complejo y permite que el sistema se recupere el equilibrio, modificado y adaptado al ambiente circundante. Cuando el sistema está autoorganizado críticamente la información fluye mejor entre todas las partes del sistema (Solé, 2009). Este tipo de sistemas tienen memoria, el funcionamiento del sistema es la clave y no las características individuales de sus elementos y los mecanismos de regulación ajustan la respuesta a la demanda y evolucionan tratando de optimizar sus recursos (Ivancevic y Ivancevic, 2006).

Sistemas de autoorganización suelen mostrar *propiedades emergentes*. La variación y el cambio son etapas inevitables e ineludibles a través del cual todo *SC* debe viajar a crecer y desarrollarse (Nicolis y Prigogine, 1977). Los *SC* pueden entenderse como una máquina que genera orden, lo que requiere aporte de energía constante generada por el caos que alimenta (que es un sistema abierto y disipativo). El orden y el desorden se necesitan mutuamente. Son conceptos antagónicos pero complementarios.

Estado Crítico. Un sistema en estado crítico puede ser entendido como un

estado cercano a la frontera de otro estado (*punto crítico*), lo que significa que cualquier pequeña perturbación puede dar lugar a un nuevo estado (*transición de fase*). Un ejemplo es el modelo de pila de arena propuesto por Per Bak (Bak et al., 1987). Los sistemas críticos se caracterizan por estar en un estado delicado de equilibrio que, a su vez, está vinculada con el medio ambiente, mostrando una gran sensibilidad (Jost, 2005). Esta situación les confiere un comportamiento altamente impredecible (caótico, no al azar) y los convierte en elevadamente inestables. Esto implica que los sistemas no pueden sostenerse a menos que reciban un suministro constante de energía (orden necesita el caos y el caos necesita el orden). Sus estados evolutivos no pasan por proceso continuo y gradual, sino que se producen a través de reorganizaciones y saltos. Cada nuevo estado es sólo una transición, un período de reposo entrópico, en palabras de Prigogine (Prigogine y Stengers, 1984; Prigogine y Holte, 1993). En consecuencia, comienzan a surgir regularidades que organizan el sistema de acuerdo con las nuevas leyes, generando otro tipo de desarrollo (Kauffman, 1995; Bak, 1999).

En situaciones límite, el deporte, los deportistas y su entorno tienen que hacer un gran esfuerzo con el fin de superar las circunstancias. En ese momento es cuando realmente se puede aprender, es cuando los sistemas deportivos crean nuevas estrategias, planes de entrenamiento y, por lo tanto, es cuando se desarrollan, cambia no se comportan de acuerdo a la nueva realidad. La rivalidad y la competitividad son los elementos que generan el comportamiento crítico.

Todos sabemos lo que es realmente interesante en el deporte es la competición. La competencia atrae a grandes masas de público, medios de comunicación y, con frecuencia, grandes cantidades de recursos financieros. Por lo general, esto conduce a los deportes a competir en un área crítica (García Manso y Martín González, 2008), en el límite del error, arriesgando, compitiendo cerca del límite. Este fenómeno favorece que el deporte evolucione. Los jugadores cambian su estilo de juego, los equipos cambian las tácticas, la dinámica de juego cambia, así, nuevas metodologías de formación surgen con el fin de apoyar los requisitos de competición, etc. Podemos ver cómo algunos deportes introducen nuevas reglas (o modificar las reglas antiguas) con el fin de mantener el atractivo de la liga.

Como hemos mencionado, los elementos de los sistemas deportivos compiten entre ellos y su tendencia natural los conduce a estructuras jerárquicas, donde algunos elementos son claramente superiores a los demás. Teóricamente, esta situación podría extenderse en el tiempo y casi no puede revertirse por medios naturales, debido a mejores equipos seguirán acaparándolos mejores recursos. Este fenómeno se conoce como *ventaja acumulativa* [*Preferential Attachment*] (Barabási y Albert, 1999), efecto *bola de nieve* o efecto *San Mateo*. Esta situación se mantendrá mientras que no haya ninguna fuente externa que modifique el ambiente en el que se está desarrollando el deporte (reglas, modelo deportivo de competición, etc.). Es por eso que es tan importante entender el funcionamiento del sistema deportivo (la liga, el equipo de juego, etc.) y cómo las modificaciones (reglas, nuevos elementos, etc.) afectan a todo el sistema.

La creación o modificación de estos sistemas suelen seguir ciertas leyes, lo que significa que algunos de estos fenómenos presentan las mismas características. Uno de los ejemplos más importantes es la aparición de *leyes de potencia* o

distribuciones de cola pesada. Muchos fenómenos naturales siguen este tipo de distribución, a menudo fractal, que también son evidentes en muchos sistemas no naturales. Las leyes de potencia presentan dos características principales: su transformación logarítmica se transforma en una línea recta y es invariante de escala (entendiendo por escala la dimensión espacial y temporal del fenómeno). Uno de las utilidades de una ley de escala radica en la vinculación de los diversos exponentes críticos que caracterizan el comportamiento singular del parámetro de orden y sus funciones de respuesta (Amaral y Ottino, 2004). Este tipo de distribución puede señalar fenómenos tales como fractalidad (Barabási y Albert, 1999), autoorganización (Dhar, 1990; Bak, 1999), agrupamientos (clustering) (Newman, 2001a; Albert y Barabási, 2002), leyes alométricas (West et al., 1997a), etc. En resumen, indican la posible presencia de sistemas complejos.

En el deporte hay una gran cantidad de ejemplos de este tipo de distribuciones: records en atletismo (Katz & Katz, 1999; Savaglio & Carbone, 2000), power lifting (García Manso et al., 2008), distribuciones de goles (Malacarne y Mendes, 2000; Mendes et al., 2007), permanencia de directivos (Aidt et al., 2006), anotación en baloncesto (de Saá Guerra et al., 2013), etc.

APLICACIÓN PRÁCTICA

En los deportes de asociación, cuando los jugadores cooperan compiten mejor como equipo. De hecho, la cooperación o la oposición (los atractores que forman el sistema), es lo que genera diferentes niveles o escalas en las que el deporte se construye y le permite evolucionar.

Los jugadores compiten por un puesto en el equipo. Esto hace que mejoren. Pero la cooperación entre ellos es lo que permite al equipo competir. Por tanto, tenemos dos comportamientos posibles. Cuando un jugador coopera es una relación sinérgica. Cuando los jugadores compiten, es una relación antagónica. La competición se da solamente cuando hay cooperación; y la mejora se da exclusivamente cuando hay oposición.

Un equipo necesita un entorno donde desarrollarse y evolucionar hacia nuevos estados. Si se comporta como asumimos, un sistema crítico auto-organizado, las inestabilidades y saltos hacia nuevas formas son el resultado de fluctuaciones internas y de interacciones con el entorno. Llegados a este punto, aparece la figura del entrenador como elemento que influencia directamente sobre el resultado final. Otro ejemplo claro de modificación del entorno son las modificaciones reglamentarias. Las reglas proveen un entorno artificial y un sistema artificial de información. Existen límites espaciotemporales, así como de interacción, reguladas por el reglamento, de manera que cualquier modificación de las reglas puede conducir a modificaciones sustanciales en la dinámica de juego. Es por ello que hemos considerado interesante hacer una breve aproximación al baloncesto desde la óptica de la complejidad en tres niveles diferentes del juego: la competición (liga), el partido y el equipo.

Aplicamos una herramienta que nos permitiese evaluar el grado de competitividad de una liga basado en la incertidumbre que existe en cada confrontación. Para ello utilizamos la entropía de Shannon para determinar el grado de incertidumbre o aleatoriedad que existe en la competición y la competitividad como indicador relativo de calidad.

Nos permitirá identificar las causas del incremento o descenso de la competitividad durante varias temporadas e incluso comparar diferentes ligas entre sí y detectar posibles influencias que otros sistemas pueden tener en el desarrollo de las mismas, (estructura económica, organización competitiva, fuente de jugadores, influencias de otros sistemas no deportivos, etc.).

Estudiamos los resultados de diferentes temporadas de dos de las mejores ligas profesionales de baloncesto, la NBA, la ACB y la División I de la liga universitaria norteamericana (NCAA). La ACB es un modelo abierto donde existen ascensos y descensos de categoría. Cada año los equipos participantes varían en función de estos ascensos y descensos de categoría. Los ocho equipos mejor clasificados juegan una eliminatoria para proclamarse campeones de liga. La NBA es un modelo de franquicias donde los equipos son divididos en dos conferencias (Este y Oeste), y a su vez estas son organizadas en tres divisiones por conferencia. Al término de la fase regular, los mejores equipos compiten en una eliminatoria dividida por conferencias. La NBA es un modelo cerrado donde no hay ascensos y descensos de categoría. La liga universitaria norteamericana está dividida en tres divisiones (División I, II y III). A su vez, cada división está dividida en conferencias de varios equipos cada una. La División I está compuesta por un total de 344 equipos (aunque el número varía ligeramente en las temporadas estudiadas) divididos en 31 conferencias.

Como criterio metodológico utilizamos, en cada caso, una matriz de confrontaciones en las que los resultados de los enfrentamientos pueden ser múltiples. Es decir, el número de victorias o derrotas de cada equipo puede presentar diferentes combinaciones. De esta manera pudimos calcular el valor de entropía de Shannon y determinar la incertidumbre.

El vector de resultados (R) representa el resultado obtenido por cada equipo en cada temporada. R , en principio, se comporta de manera aleatoria, en el sentido que no conocemos el resultado final, pero los resultados de temporadas anteriores (histórico de resultados), nos pueden brindar algún indicio. Los valores de R de temporadas anteriores divididos por la suma del total de partidos pueden representar también una distribución de probabilidad discreta. Cuando el conjunto de probabilidades de un sistema es conocido podemos definir la entropía de Shannon (S) que es una medida de la incertidumbre promedio. Es máxima cuando todos los valores p_i sean iguales. El valor de S cambia con el valor de N , número de equipos, y por tanto no son comparables si en temporadas diferentes el número de equipos cambia. Por ello es preferible utilizar la entropía normalizada (S/n), donde el valor está acotado entre 0 y 1, y donde 1 corresponde a la situación en la que todos los valores p_i son iguales.

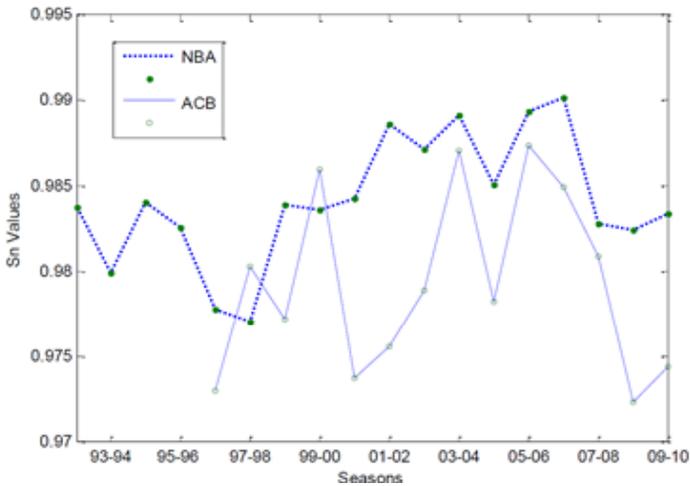


Figura 1. Valores de entropía de 18 ligas de la NBA (línea de puntos), desde 1992/93 a 2009/10, y 14 temporadas de la ACB (línea continua), temporadas 1996/97 a 2009/10.

Eje X muestra la temporada y el eje Y muestra los valores normalizados de entropía (Entropía de Shannon).

Una liga es más competitiva cuando es más aleatoria. Sin embargo, cuando la competición es menos aleatoria, el grado de competitividad decrece significativamente. Tanto la ACB como la NBA muestran un alto grado de competitividad. En ambas ligas los niveles de entropía son elevados (rango: 0.9851 a 0.9902). Aunque estos períodos son más estables en la NBA. En cuanto a la liga NCAA, hemos de tener en cuenta el gran número de equipos participantes, de ahí, la gran heterogeneidad de la liga y de los equipos (presupuestos, jugadores, instalaciones, etc.). Los valores de S_n oscilan entre 0.9679 hasta 0.9583. Estos valores se encuentran bastantes alejados de las ligas profesionales pero a pesar de este hecho, la liga NCAA es la más estable de las tres (NCAA S_n media=0.9631 \pm 0.0033).

PARTIDO. La evolución del marcador y el resultado final son lo que generan incertidumbre para cada partido, y por ende, para la clasificación en la liga. La anotación es un proceso altamente dinámico y de tipo no-lineal, provocando que en el baloncesto sea algo excitante e impredecible.

Hemos estudiado un total de 6150 partidos (5 temporadas) de la fase regular de la liga NBA y los tiempos de anotación. Su logro poder ser considerado un proceso aleatorio y tratado como un proceso de Poisson. Este tipo de distribución está definida por el índice de dispersión (λ), que es la relación entre el número de eventos (canastas) y momento del partido en el que se consiguen. En la muestra analizada, la diferencia de tiempo entre canasta presenta un pico en torno a los 20 segundos y un valor máximo de 310 segundo.

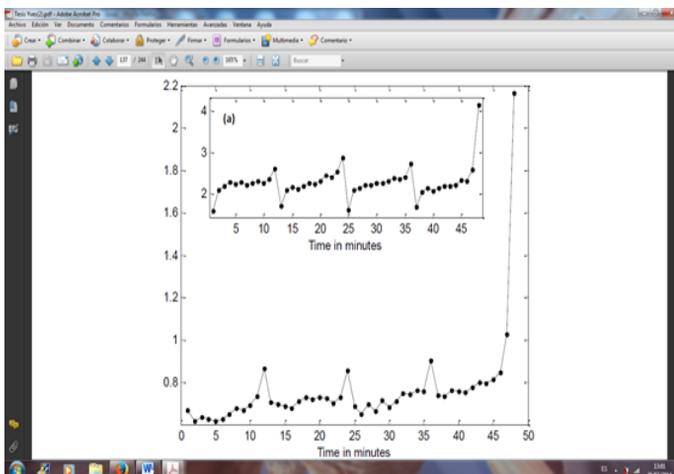


Figura 2. Muestra en el eje Y el índice de dispersión (relación entre la varianza y la media) de los puntos marcados en cada minuto (eje X) de los 6150 partidos analizados. En el sub-plot (a) representa el número de puntos conseguidos (eje Y') en cada minuto del partido (eje X').

El índice de dispersión (relación entre la varianza y la media), muestra que la mayor parte los cuartos permanecen por debajo del valor 1 (sub-disperso). Solamente al final de cada curato se aprecia un incremento significativo en estos valores, pero siempre por debajo del valor 1. Esto significa que el comienzo de cada cuarto es más predecible que el final. Tan sólo en el minuto 47 se alcanza el valor 1, lo que indica un proceso puro de Poisson. El minuto 48 requiere especial atención, ya que excede significativamente el valor 1. Esto sugiere que el último minuto del partido sigue una dinámica completamente diferente que el resto del partido.

La mayor parte de los partidos acabaron con una diferencia menor o igual a 10 puntos (65%), un 33% de los partidos finalizaron con una diferencia de entre 11 y 28 puntos, y tan sólo un 2% lo hizo con diferencias superiores a 28 puntos. Por consiguiente, podemos distinguir tres perfiles de partidos, en base al resultado final. Los más competidos, con una diferencia menor de 11 puntos. Otros menos competidos, entre 11 y 28 puntos, y partidos completamente desequilibrados, de más de 28 puntos de diferencia, donde existe una clara superioridad de un equipo sobre el otro.

La diferencia de puntos puede usarse como un indicador de la dinámica del partido, ya que funciona como parámetro de orden. El marcador es un reflejo de las diferentes acciones y comportamientos que resultan del juego y de la interacción de los jugadores. Dado el alto grado de aleatoriedad que existe en la mayor parte de los partidos con menos de diferencia 11 puntos, se puede deducir que la mayoría de los partidos tienen un alto grado de incertidumbre. De esta manera la NBA puede ser considerada como un ejemplo de *Hipótesis de la Reina Roja*, propuesta por Van Valen (1973): “Para un sistema evolutivo, la mejora continua es necesaria para sólo mantener su ajuste a los sistemas con los que está co-evolucionando”.

EQUIPO. Realizamos una aproximación al funcionamiento de los equipos tratándolos como redes de jugadores. Partimos de la idea de que la clave del éxito de un equipo es la auto-organización y así lograr sus objetivos y superar

las amenazas externas. Esto se consigue a través de interacciones locales para compensar el desequilibrio ocasionado por estos agentes externos. Para ello todos sus elementos trabajan de manera coordinada y eficaz. Estudiamos la manera de relacionarse los jugadores en la cancha mediante parámetros del juego tales como pases, bloqueos y creaciones de espacio. Además hemos relacionado estas acciones con la evolución temporal del marcador. La teoría de redes se aplica en diversos campos del conocimiento y de estudio como la biología, matemáticas, economía, ecología, física, sociología, ingeniería, y como no, en las ciencias del deporte. En 1999 se introdujo el concepto de red libre de escala (*scale-free network*) propuesta por Albert-László Barabási y Reka Albert, al cual se le conoce como el modelo Barabási-Albert (Barabási y Albert, 1999). Este modelo explica cómo se forman al azar redes libres de escala mediante un mecanismo denominado ventaja acumulativa (*preferential attachment*).

Nosotros proponemos el uso de la teoría de redes como estrategia para averiguar las características de un equipo de baloncesto. Esta metodología nos puede proporcionar la oportunidad de descubrir cómo funciona un equipo de baloncesto a través del comportamiento de los jugadores a través de sus interacciones reales. Hemos querido abordar el problema desde un punto de vista de colaboración. Desde el proceso interno y no desde aspectos externos. Como objeto de estudio, tomamos el último partido de la final de conferencia Este de la NBA de 2011, que enfrentó a Chicago Bulls y a Miami Heat. Definimos como variables de estudio la interacción de los jugadores en la cancha, es por eso que medimos, como medio de comunicación de los jugadores en la cancha y como indicador del flujo de juego, el número de pases, los bloqueos y las creaciones de espacio para cada jugada.

Los pases representan el ejemplo más claro de la interacción de los jugadores en la cancha, porque el hecho de pasar el balón a un compañero de equipo permite crear una situación de tiro u otra situación favorable. Los bloqueos también representan un ejemplo interesante de la interacción de los jugadores porque el objetivo de un bloqueo es neutralizar a un defensor y/o buscar una situación de superioridad tras el bloqueo, tal como una penetración clara hacia canasta, un tiro claro, un aclarado, etc. Este parámetro está relacionado con el siguiente. La creación de espacio representa también la interacción entre jugadores.

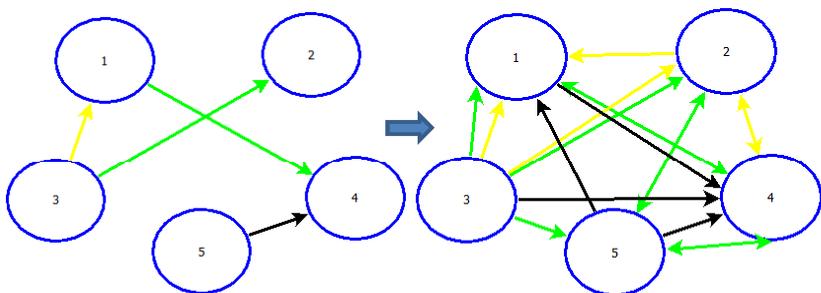


Figura 3. Muestra como el comportamiento de un equipo de baloncesto evoluciona desde una red de pequeño mundo (*small-world*) hacia una red libre de escala. Habitualmente resuelven la situación de juego con sólo unos pocos pasos, pero si la situación se hace más crítica modifican el flujo de juego hacia lo que sería una red libre de escala.

Los resultados muestran que la frecuencia de pases, bloqueos y creaciones de espacio no permanecen estables, sino que varían en función de la situación del partido (evolución del marcador). Los equipos modifican su estructura de red en base a la situación a la que se enfrentan en una misma jugada o durante el partido, tal y como muestra la presencia de leyes de potencia truncadas. Estos puntos de inflexión coinciden perfectamente con situaciones bien definidas del partido. En conclusión podemos decir que algunos parámetros, tales como pases, bloqueos y creaciones de espacio, pueden ser interpretados como interacciones entre los jugadores. Además, se pueden utilizar con el fin de analizar la dinámica y el ritmo del juego en un partido de baloncesto real, entendida como una red dinámica. Los equipos tratan de derrotar a sus oponentes. Un partido de baloncesto se puede interpretar como un sistema auto-organizado en estado crítico porque el flujo de juego no se mantiene estable y los equipos (red de jugadores) tratan de superar la situación mediante la auto-organización.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los diferentes niveles analizados (liga, juego y equipo) podemos decir que el baloncesto puede ser considerado como un sistema complejo. En consecuencia, las herramientas propias de los análisis no-lineal se convierten en instrumentos capaces de aportar información que con las metodologías clásicas y los procedimientos lineales no somos capaces de detectar.

REFERENCIAS

- Aidt, T. S., Leong, B., Saslaw, W. C. y Sgroi, D. (2006). A power-law distribution for tenure lengths of sports managers. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 370(2), 697-703. doi:10.1016/j.physa.2006.03.016
- Albert, R. y Barabási, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 47-97. doi:10.1103/RevModPhys.74.47
- Amaral, L.A.N. y Ottino, J. M. (2004). Complex networks. *The European Physical Journal B - Condensed Matter*, 38(2), 147-162. doi:10.1140/epjb/e2004-00110-5
- Bak, P. (1999). *How Nature Works: the science of self-organized criticality*. (2.^a ed.). New York: Copernicus. Springer-Verlag.
- Bak, P., Tang, C. y Wiesenfeld, K. (1987). Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise. *Physical Review Letters*, 59(4), 381-384. doi:10.1103/PhysRevLett.59.381
- Barabási, A.-L. y Albert, R. (1999). Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439), 509-512. doi:10.1126/science.286.5439.509
- De Saá Guerra, Y., Martín Gonzalez, J. M., Montesdeoca, S. S., Rodriguez Ruiz, D., Arjonilla López, N. y García Manso, J. M. (2013). Basketball scoring in NBA games: An example of complexity. *Journal of Systems Science and Complexity*, 26(1), 94-103. doi:10.1007/s11424-013-2282-3
- Dhar, D. (1990). Self-organized critical state of sandpile automaton models. *Physical Review Letters*, 64(14), 1613-1616. doi:10.1103/PhysRevLett.64.1613
- García Manso, J. M. G. y Martín González, J. M. (2008). *La formación del deportista en un*

sistema de rendimiento deportivo: Autoorganización y emergencia, entre el orden y el caos. Editorial Kinesis.

- García Manso, J. M., Martín González, J. M., Da Silva-Grigoletto, M. E., Vaamonde, D., Benito, P. y Calderón, J. (2008). Male powerlifting performance described from the viewpoint of complex systems. *Journal of Theoretical Biology*, 251(3), 498-508. doi:10.1016/j.jtbi.2007.12.010
- Goodwin, B. (2002). *How the Leopard Changed Its Spots. [Las Manchas Del Leopardo]*. Tusquets Editor.
- Holland, J. H. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Perseus Books Group.
- Ivancevic, V. G. y Ivancevic, T. T. (2006). *High-Dimensional Chaotic and Attractor Systems: A Comprehensive Introduction*. Springer.
- Jost, J. (2005). *Dynamical Systems: Examples of Complex Behaviour*. Springer Science & Business.
- Katz, S. J. y Katz, L. (1999). Power laws and athletic performance. *Journal of Sports Sciences*, 17(6), 467-476. doi:10.1080/026404199365777
- Kauffman, S. A. (1995). *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press.
- Malacarne, L. y Mendes, R. . (2000). Regularities in football goal distributions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 286(1-2), 391-395. doi:10.1016/S0378-4371(00)00363-0
- Mendes, R. S., Malacarne, L. C. y Anteneodo, C. (2007). Statistics of football dynamics. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 363(3), 357-363. doi:10.1140/epjb/e2007-00177-4
- Newman, M.E.J. (2001). Clustering and preferential attachment in growing networks. *Physical Review E*, 64(2), 025102. doi:10.1103/PhysRevE.64.025102
- Nicolis, G. y Prigogine, I. (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations* (1.ª ed.). John Wiley & Sons.
- Prigogine, I. y Holte, J. (1993). *Chaos: The New Science*. University Press of America.
- Prigogine, I. y Stengers, I. (1984). *Order out of chaos: man's new dialogue with nature*. Bantam Books.
- Savaglio, S. y Carbone, V. (2000). Human performance: Scaling in athletic world records. *Nature*, 404(6775), 244. doi:10.1038/35005165
- Solé, R. (2009). *Complex networks [Redes complejas]* (1st. ed.). Barcelona: Tusquets.
- Solé, R. y Goodwin, B. (2002). *Signs of life: how complexity pervades biology*. Basic Books.
- Vicsek, T. (2002). Complexity: The bigger picture. *Nature*, 418(6894), 131. doi:10.1038/418131a
- West, G. B., Brown, J. H. y Enquist, B. J. (1997). A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology. *Science*, 276(5309), 122-126. doi:10.1126/science.276.5309.122